



TESIS - TE142599

# INISIASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH

MOCHAMMAD WAHYUDI  
07111650010004

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
Dimas Anton Asfani, ST., MT., PhD.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018





TESIS - TE142599

# **INISIASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH**

MOCHAMMAD WAHYUDI  
07111650010004

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Eng I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
Dimas Anton Asfani, ST., MT., PhD.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



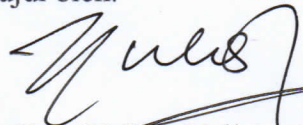
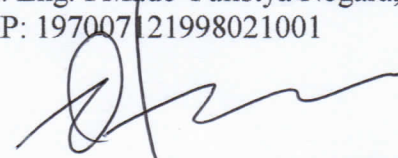
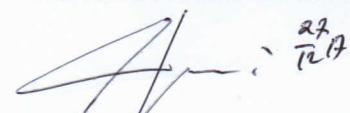
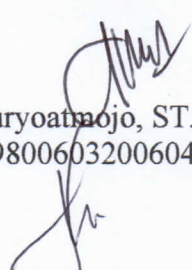
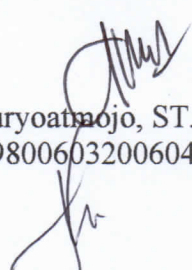
## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
oleh:

Mochammad Wahyudi  
NRP. 07111650010004

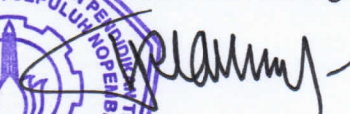
Tanggal Ujian : 19 Desember 2017  
Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh:

-   
1. Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc. (Pembimbing I)  
NIP: 197007121998021001
-   
2. Dimas Anton Asfani, ST., MT., PhD. (Pembimbing II)  
NIP: 198109052005011002
-   
3. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. (Penguji)  
NIP: 197311192000031001
-   
4. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D. (Penguji)  
NIP: 198006032006041003
-   
5. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. (Penguji)  
NIP: 197411292000121001



Sekretaris Fakultas Teknologi Elektro

  
Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.  
NIP: 197002121995121001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **PERNYATAAN KEASLIAN TESIS**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“INISIASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 19 Desember 2017



Mochammad Wahyudi

NRP. 07111650010004

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# INISIASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH

Nama mahasiswa : Mochammad Wahyudi  
NRP : 07111650010004  
Pembimbing : 1. Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
2. Dimas Anton Asfani, ST., MT., PhD.

## ABSTRAK

Feroresonansi merupakan sebuah interaksi pada inti transformator yang menimbulkan tegangan abnormal. Kemunculan feroresonansi sangat dipengaruhi oleh parameter dan kondisi sistem. Dalam memahami karakteristik tersebut secara fisik, pengujian inisiasi feroresonansi dilakukan pada transformator tegangan rendah satu fasa dan tiga fasa. Variasi tegangan sumber dan kapasitansi diberikan pada transformator satu fasa, sedangkan variasi pelepasan fasa dan kapasitansi serta ketidaksimetrisan kaki inti diberikan pada transformator tiga fasa. Respon tegangan primer transformator, meliputi bentuk gelombang, magnitudo, dan harmonisa, dianalisis. Diagram bifurkasi digunakan untuk mengenali secara lebih mudah karakteristik feroresonansi terhadap variasi tegangan sumber, sedangkan *fast fourier transform* (FFT) digunakan untuk mendapatkan spektrum harmonisa yang akan menunjukkan mode feroresonansi. Kemudian *total harmonic distortion* (THD) dihitung berdasarkan spektrum harmonisa tersebut untuk mengetahui tingkat harmonisa tegangan ketika kondisi feroresonansi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa faktor inisiasi yang diberikan mampu menunjukkan respon feroresonansi dengan efek yang berbeda. Efek feroresonansi yang berbahaya (tegangan lebih dan harmonisa tinggi) dijumpai pada pengujian transformator satu fasa dengan kapasitansi 50 uF, 80 uF, dan 100 uF. Sementara itu, pengujian transformator tiga fasa dengan variasi kapasitansi memberikan efek feroresonansi yang lebih berbahaya (tegangan lebih) daripada variasi pelepasan fasa (tegangan kurang). Keanehan respon feroresonansi lebih mudah diamati pada fasa S yang memiliki kaki inti lebih besar daripada dua fasa lainnya. Lonjakan nilai dan distorsi bentuk gelombang secara signifikan akibat peningkatan tegangan sumber sekitar 1 V (*jump phenomenon*) ditemui pada pengujian transformator satu fasa dengan kapasitansi 80 uF dan 100 uF. Respon gelombang tegangan primer transformator yang diperoleh diidentifikasi sebagai mode fundamental. Melalui penelitian ini, inisiasi dan karakteristik feroresonansi diharapkan agar mampu dipahami secara lebih baik melalui pendekatan fisik.

Kata kunci: diagram bifurkasi, *fast fourier transform* (FFT), inisiasi dan karakteristik feroresonansi, ketidaksimetrisan kaki inti, variasi tegangan sumber, kapasitansi, dan pelepasan fasa.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **FERRORESONANCE INITIATION ON LOW VOLTAGE TRANSFORMER**

By : Mochammad Wahyudi  
Student Identity Number : 07111650010004  
Supervisor(s) : 1. Dr. Eng I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
2. Dimas Anton Asfani, ST., MT., PhD.

## **ABSTRACT**

Ferroresonance is an interaction on transformer core that creates abnormal voltage. The appearance of ferroresonance is highly affected by parameter and condition of system. In order to understand its characteristic physically, ferroresonance initiation experiment was conducted to a low voltage single phase transformer and a low voltage three phases transformer. The variations of voltage source magnitude and capacitance were given to the single phase transformer, while the variations of opened phases (opening of switch) and capacitance as well as unsymmetrical core leg were applied to the three phases transformer. The response of transformer primary voltage including waveform, magnitude, and harmonics was then analyzed. Bifurcation diagram was employed to understand easier the ferroresonance's characteristics to voltage source variation, whereas fast fourier transform (FFT) was used to obtain harmonics spectrum that will explain ferroresonance mode. Total harmonics distortion (THD) was then calculated based on the harmonics spectrum in order to know the level of harmonics during ferroresonance condition. The experimental results showed that the initiation factors given to both of transformers created ferroresonance response with different effects. The most dangerous response (high level of overvoltage and harmonics) was seen in the experiment of single phase transformer with capacitance of 50  $\mu$ F, 80  $\mu$ F, and 100  $\mu$ F. In addition, the experiment of three phases transformer with capacitance variations resulted in more dangerous effect (overvoltage) than experiment with opened phases (undervoltage). The abnormal responses were observed more clearly in the S phase with its greater core leg than the others. Jump phenomenon that was indicated by a significant increase of magnitude and distortion of transformer primary voltage due to a little increase of voltage source about 1 V was seen in the experiment of single phase transformer with capacitance of 80  $\mu$ F and 100  $\mu$ F. The responses of ferroresonance for all experimental results were identified as fundamental mode. By this experiment, the ferroresonance characteristics and initiations were expected to be understood more clearly, especially its physical mechanism.

Key words: bifurcation diagram, fast fourier transform (FFT), initiation and characteristic of ferroresonance, unsymmetrical core leg, variation of voltage source, capacitance, and opened phases.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Penulis dengan segala kerendahan hati melantunkan puji syukur Alhamdulillah atas kehadiran Allah SWT yang telah mencurahkan hidayah dan karunia-Nya, sehingga penyusunan buku tesis yang berjudul “Inisiasi Feroresonansi pada Transformator Tegangan Rendah” dapat diselesaikan dengan baik. Laporan ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) pada Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Dalam proses penyusunan buku tesis ini, penulis banyak mendapat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan yang penuh kebanggaan dan kebahagiaan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Alm. ayah, ibu, dan kakak-kakak tercinta yang selalu memberikan doa dan semangat yang tak terbatas dan tak ternilai harganya.
2. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc., bapak Dimas Anton Asfani, ST., MT., dan bapak IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu berharga demi memberikan bimbingan dan saran yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Narjono dan bapak Daniar Fahmi, ST., MT. yang telah memberikan banyak bantuan dan ilmu-ilmu kelistrikan praktis.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Elektro yang telah banyak memberikan ilmu dan menginspirasi penulis selama kegiatan perkuliahan.
5. Para asisten Laboratorium Tegangan Tinggi dan Konversi Energi Listrik yang telah bekerja sama, membantu, dan menemani penulis selama pengujian tesis dilakukan.
6. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementrian Keuangan Indonesia selaku pemberi beasiswa, beserta rekan-rekan penerima beasiswa LPDP dan BUDI ITS yang turut menyemangati penulis selama kegiatan perkuliahan.

Akhir kata “Tiada Gading yang Tak Retak”, penulis menyadari bahwa penyusunan buku tesis ini masih memerlukan beberapa penyempurnaan. Oleh

karena itu, kritik dan saran yang bersifat konstruktif sangat diharapkan. Semoga buku tesis ini dapat memberikan manfaat bagi kalangan akademisi dan praktisi, meliputi membuka wawasan mengenai fenomena feroresonansi secara fisik dan mendorong penciptaan teknologi baru dalam mitigasi feroresonansi.

Surabaya, 19 Desember 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	v
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Kontribusi .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait .....	5
2.2 Teori Dasar .....	9
2.2.1 Mekanisme Fisik Resonansi .....	9
2.2.2 Mekanisme Fisik Feroresonansi .....	11
2.2.3 Karakteristik Feroresonansi .....	14
2.2.4 Mode Feroresonansi .....	15
2.2.5 Diagram Bifurkasi .....	17
2.2.6 <i>Fast Fourier Transform</i> (FFT) .....	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	19
3.1 Pengujian Kurva Magnetisasi Inti .....	20
3.2 Penentuan Nilai Kapasitansi .....	26
3.3 Pengujian Feroresonansi .....	28

3.3.1	Transformator Satu Fasa.....	28
3.3.2	Transformator Tiga Fasa .....	32
3.4	Simulasi Feroresonansi.....	35
3.4.1	Transformator Satu Fasa.....	35
3.4.2	Transformator Tiga Fasa .....	37
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....		43
4.1	Inisiasi dan Karakteristik Feroresonansi pada Transformator Satu Fasa	43
4.1.1	Kecenderungan Besar Arus dan Tegangan pada Sumber, Kapasitor, dan Transformator.....	43
4.1.2	Kecenderungan Bentuk Gelombang Tegangan Transformator .....	48
4.1.3	Diagram Bifurkasi .....	60
4.1.4	Spektrum Harmonisa .....	64
4.1.5	<i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) .....	78
4.1.6	Pengkategorian Respon Sistem .....	87
4.2	Inisiasi dan Karakteristik Feroresonansi pada Transformator Tiga Fasa	90
4.2.1	Variasi Pelepasan Fasa .....	90
4.2.2	Variasi Kapasitansi .....	99
BAB 5 PENUTUP .....		107
5.1	Kesimpulan.....	107
5.2	Saran.....	108
DAFTAR PUSTAKA.....		109
LAMPIRAN .....		113



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rangkaian Feroresonansi pada Transformator Pengukuran [16]: a) <i>Single Line Diagram</i> . b) Pemodelan. c) Rangkaian <i>Thevenin</i> (Rangkaian Dasar Feroresonansi).....	6
Gambar 2.2	Feroresonansi [19]: a) Rangkaian Pengujian. b) Pemodelan. c) Gelombang Feroresonansi Berdasarkan Hasil Pengujian Tegangan Sumber 12 V. ....	7
Gambar 2.3	Hubungan antara Kapasitansi dan Induktansi Non-Linier dalam Grafik Rudenberg [17] .....	8
Gambar 2.4	Gelombang Tegangan Kapasitor Kondisi Feroresonansi Berdasarkan Pengujian dengan Tegangan Sumber Sebesar Tegangan Nominal Transformator [17].....	9
Gambar 2.5	Resonansi Seri [1]: a) Rangkaian. b) Vektor Tegangan dan Arus.	10
Gambar 2.6	Feroresonansi [1]: a) Rangkaian Seri. b) Karakteristik Fluks. c) Tegangan, Arus dan Fluks sebagai Fungsi Waktu. ....	13
Gambar 2.7	Ilustrasi Karakteristik Feroresonansi [1]: a) Rangkaian Seri. b) Sensivitas terhadap Parameter Sistem dan Fenomena Non-Linier (Jump Phenomenon). c) Sensivitas terhadap Kondisi Inisial. ....	14
Gambar 2.8	Karakteristik Feroresonansi Mode Fundamental [1].....	16
Gambar 2.9	Karakteristik Feroresonansi Mode Subharmonik [1] .....	16
Gambar 2.10	Karakteristik Feroresonansi Mode Quasi-Periodik [1].....	16
Gambar 2.11	Karakteristik Feroresonansi Mode Chaotik [1] .....	16
Gambar 2.12	Karakteristik Diagram Bifurkasi [30]: a) Kapasitansi <i>Stray</i> . b) Kapasitansi Grading. ....	18
Gambar 3.1	Alur Pelaksanaan Penelitian Secara Umum. ....	19
Gambar 3.2	Rangkaian Pengujian Tanpa Beban [32] .....	21
Gambar 3.3	Transformator Satu Fasa: a) Spesifikasi. b) Kurva Magnetisasi Inti. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan. ....	21
Gambar 3.4	Kecenderungan Nilai Induktansi terhadap Tegangan Primer Transformator Satu Fasa.....	22
Gambar 3.5	Transformator Tiga Fasa: a) Spesifikasi b) Kurva Magnetisasi Fasa R. c) Kurva Magnetisasi Fasa S. d) Kurva Magnetisasi Fasa T. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan. ....	23
Gambar 3.6	Kecenderungan Induktansi pada Transformator Tiga Fasa: a) Fasa R. b) Fasa S. c) Fasa T. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan.....	24
Gambar 3.7	Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator Satu Fasa Berdasarkan <i>Rudenberg's Graphical Method</i> .....	27
Gambar 3.8	Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator Tiga Fasa Berdasarkan <i>Rudenberg's Graphical Method</i> : a) Fasa R. b) Fasa T.....	28

Gambar 3.9	Pengujian Feroresonansi pada Transformator Satu Fasa: a) Rangkaian. b) Realisasi.....	29
Gambar 3.10	Alur Akuisisi dan Pengolahan Data pada Transformator Satu Fasa .....	30
Gambar 3.11	Kode Program Penyajian Diagram Bifurkasi pada MATLAB .....	31
Gambar 3.12	Pengujian Feroresonansi pada Transformator Tiga Fasa: a) Rangkaian Variasi Pelepasan Fasa. b) Rangkaian Variasi Kapasitansi. d) Realisasi. ....	33
Gambar 3.13	Alur Akuisisi dan Pengolahan Data pada Transformator Tiga Fasa .....	34
Gambar 3.14	Rangkaian Simulasi Feroresonansi pada Transformator Satu Fasa .....	36
Gambar 3.15	Kurva Arus Resistif terhadap Tegangan pada Transformator Satu Fasa sebagai Komponen Resistansi Non-linier pada ATPDraw. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan.....	36
Gambar 3.16	Alur Pengolahan Data Simulasi pada Transformator Satu Fasa...	37
Gambar 3.17	Rangkaian Simulasi Feroresonansi pada Transformator Tiga Fasa: a) Variasi Pelepasan Fasa. b) Variasi Kapasitansi.....	38
Gambar 3.18	Kurva Arus Resistif pada Transformator Tiga Fasa sebagai Komponen Resistansi Non-linier pada ATPDraw: a) Fasa R. b) Fasa S. c) Fasa T. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan.....	40
Gambar 3.19	Alur Pengolahan Data Simulasi pada Transformator Tiga Fasa...	41
Gambar 4.1	Kecenderungan Arus dan Tegangan pada Kapasitor dan Transformator terhadap Tegangan Sumber untuk Variasi Kapasitansi: a) 10 uF. b) 30 uF. c) 50 uF. d) 80 uF. e) 100 uF.....	45
Gambar 4.2	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian Tanpa Kapasitansi dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 50 V.....	49
Gambar 4.3	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 10 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V. ....	50
Gambar 4.4	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 30 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V. ....	51
Gambar 4.5	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 50 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V. ....	52
Gambar 4.6	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 80 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 17 V. b) 18 V. c) 30 V. d) 50 V. ....	53
Gambar 4.7	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 100 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 18 V. b) 19 V. c) 30 V. d) 50 V. ....	54

Gambar 4.8	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 10 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20 V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.....	55
Gambar 4.9	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 30 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20 V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.....	56
Gambar 4.10	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 50 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20 V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.....	57
Gambar 4.11	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 80 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 13 V. b) 14 V. c) 30 V. d) 50 V.....	58
Gambar 4.12	Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 80 uF dan Variasi Tegangan Sumber: a) 13 V. b) 14 V. c) 30 V. d) 50 V.....	59
Gambar 4.13	Diagram Bifurkasi Berdasarkan Hasil Pengujian untuk Variasi Kapasitansi: a) 10 uF. b) 30 uF. c) 50 uF. d) 80 uF. e) 100 uF. ....	61
Gambar 4.14	Diagram Bifurkasi Berdasarkan Hasil Simulasi untuk Variasi Kapasitansi: a) 10 uF. b) 30 uF. c) 50 uF. d) 80 uF. e) 100 uF. ....	63
Gambar 4.15	THD Tegangan Berdasarkan Hasil Pengujian untuk Variasi Kapasitansi: a) 0 uF. b) 10 uF. c) 30 uF. d) 50 uF. e) 80 uF. f) 100 uF.....	81
Gambar 4.16	THD Tegangan Berdasarkan Hasil Simulasi untuk Variasi Kapasitansi: a) 10 uF. b) 30 uF. c) 50 uF. d) 80 uF. e) 100 uF. ....	83
Gambar 4.17	Hubungan Tegangan Transformator dan THD.....	88
Gambar 4.18	Hubungan Tingkat Tegangan Lebih Transformator dan THD.....	88
Gambar 4.19	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Kondisi Normal pada Tegangan Sumber 220 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	91
Gambar 4.20	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	91
Gambar 4.21	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	91
Gambar 4.22	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa R dan S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V: a) Fasa R, S, dan T. b) Fasa S. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.....	92
Gambar 4.23	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa R dan T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.....	92

Gambar 4.24	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi Fasa S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.....	96
Gambar 4.25	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi Fasa T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.....	96
Gambar 4.26	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi Fasa R dan S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	96
Gambar 4.27	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa R dan T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	97
Gambar 4.28	Hubungan Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Tegangan Sumber 200 V .....	98
Gambar 4.29	Hubungan Tingkat Tegangan Lebih Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Tegangan Sumber 200 V.....	98
Gambar 4.30	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian dengan Kapasitansi 10 $\mu$ F dan Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	100
Gambar 4.31	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian dengan Kapasitansi 50 $\mu$ F dan Tegangan Sumber 100 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	100
Gambar 4.32	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 100 $\mu$ F dan Tegangan Sumber 100 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.100	
Gambar 4.33	Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi dengan Kapasitansi 10 $\mu$ F dan Tegangan Sumber 100 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T. ....	103
Gambar 4.34	Hubungan Tegangan Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Variasi Kapasitansi.....	104
Gambar 4.35	Hubungan Tingkat Tegangan Lebih Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Variasi Kapasitansi.....	104

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian Kondisi Normal (Tanpa Kapasitor).....	67
Tabel 4.2	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 10 uF .....	68
Tabel 4.3	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 30 uF .....	69
Tabel 4.4	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 50 uF .....	70
Tabel 4.5	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 80 uF .....	71
Tabel 4.6	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 100 uF .....	72
Tabel 4.7	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 10 uF .....	73
Tabel 4.8	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 30 uF .....	74
Tabel 4.9	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 50 uF .....	75
Tabel 4.10	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 80 uF .....	76
Tabel 4.11	Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 100 uF .....	77
Tabel 4.12	Kecenderungan THD Berdasarkan Hasil Pengujian .....	85
Tabel 4.13	Kecenderungan THD Berdasarkan Hasil Simulasi .....	86
Tabel 4.14	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan Sesuai Kondisi Fasa.....	93
Tabel 4.15	Spektrum Harmonisa Sesuai Kondisi Fasa .....	94
Tabel 4.16	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan Sesuai Variasi Kapasitansi ..	101
Tabel 4.17	Spektrum Harmonisa dan THD Sesuai Variasi Kapasitansi .....	103

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Istilah feroresonansi dikenal pertama kali di tahun 1920 sebagai sebuah fenomena osilasi non-linier yang melibatkan induktansi non-linier (ditemui pada kurva magnetisasi inti transformator), kapasitansi, sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah [1]. Pada umumnya, kemunculan feroresonansi ditandai oleh tegangan abnormal, seperti bentuk gelombang terdistorsi atau magnitudo tegangan tidak wajar (tegangan lebih atau kurang). Adanya tegangan abnormal tersebut akan memberikan tekanan elektris dan termal yang mampu merusak peralatan listrik. Respon feroresonansi juga dapat mengganggu kinerja rele, sehingga sistem proteksi tidak sanggup bekerja secara tepat. Di samping itu, kemunculan feroresonansi di lapangan sangat sulit diprediksi. Dengan adanya bahaya-bahaya tersebut, fenomena ini masih mendapatkan perhatian khusus dalam sistem tenaga listrik hingga saat ini.

Feroresonansi yang juga disebut sebagai *ferromagnetic resonance* [2] berbeda dengan resonansi linier. Praktisnya, resonansi linier hanya melibatkan induktansi pada area non-saturasi dari kurva magnetisasi inti transformator, sedangkan feroresonansi turut melibatkan induktansi pada area saturasi yang bernilai lebih kecil. Hal ini menimbulkan karakteristik alamiah feroresonansi, yaitu sebagai fenomena dinamis yang non-linier, antara lain: a) sensitif terhadap parameter dan kondisi sistem, b) adanya perubahan respon secara mendadak (*jump phenomenon*) [1].

Pada awalnya, studi berdasarkan pendekatan matematis linier (konvensional) dilakukan untuk memahami karakteristik feroresonansi. Akan tetapi, studi berdasarkan metode dinamis yang non-linier atau teori *chaos* lebih sesuai dibandingkan metode matematis [3]. Studi berbasis simulasi juga mampu memberikan hasil berdasarkan kejadian di lapangan, seperti kasus kemunculan feroresonansi akibat sambaran petir [4-6], gangguan hubung singkat [5,7], operasi pemutus daya [3,8-11], dan ketidaksimetrisan distribusi fluks pada inti

transformator [12,13]. Selain itu, sensitivitas respon feroresonansi terhadap parameter dan kondisi sistem lebih mudah dipahami melalui simulasi [14,15].

Studi feroresonansi berbasis pengujian akan mampu menjelaskan fenomena ini secara fisik. Akan tetapi, pengujian di lapangan tidak memungkinkan terutama karena faktor resiko yang tinggi dan perekaman data yang kurang baik [16,17]. Pengujian skala laboratorium dapat dijadikan sebagai pendekatan alternatif dalam memahami feroresonansi secara fisik [16,18-22]. Keunggulannya adalah pengujian dapat terkontrol dan respon feroresonansi terekam dengan baik.

Metode mitigasi feroresonansi telah diuji pada [16,19], sedangkan efek kondisi inisial sistem terhadap respon feroresonansi telah diuji pada [18,20,21]. Pengujian mengenai efek parameter sistem juga telah dilakukan [20-22]. Parameter sistem yang diteliti pada [20,21] hanya nilai tegangan sumber, sedangkan pengujian [22] melibatkan nilai tegangan sumber, kapasitansi, dan tegangan nominal transformator.

Pada pengujian [22] inisiasi feroresonansi dilakukan pada transformator tegangan rendah satu fasa dengan inti toroidal dan jenis material M5. Variasi tegangan sumber dilakukan dengan menaikkan tegangan secara bertahap dan kontinyu hingga mencapai sekitar dua kali dari tegangan nominal transformator. Kemudian tegangan sumber diturunkan hingga bernilai nol. Melalui skema pengujian tersebut, kecenderungan respon feroresonansi pada tegangan kapasitor terhadap variasi tegangan sumber mampu dipahami. Akan tetapi, kecenderungan tegangan transformator, seperti bentuk gelombang, magnitudo, dan harmonisa, tidak dijelaskan. Padahal, apabila respon tegangan transformator tersebut diketahui maka tingkat bahaya kemunculan feroresonansi terhadap transformator dapat dipahami.

Inisiasi feroresonansi pada transformator tiga fasa berbasis pengujian juga perlu diselidiki karena sebagian besar transformator pada jaringan transmisi dan distribusi listrik adalah transformator tiga fasa. Pada pengujian [16] inisiasi feroresonansi dilakukan pada dua transformator satu fasa yang diseri untuk memodelkan kasus kemunculan feroresonansi pada transformator tiga fasa akibat kesalahan operasi pemutus daya (fasa terlepas) di lapangan. Akan tetapi, skema



pengujian tersebut tidak mampu menunjukkan efek fluks mutual pada inti transformator tiga fasa terhadap respon feroresonansi yang muncul.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Pengujian inisiasi feroresonansi dilakukan pada transformator tegangan rendah satu fasa dan tiga fasa yang memiliki inti EI dan jenis material H. Tipe inti tersebut digunakan secara umum di lapangan. Variasi tegangan sumber dan kapasitansi diberikan pada transformator satu fasa, sedangkan variasi pelepasan fasa (akibat pembukaan pemutus daya) dan kapasitansi serta ketidaksimetrisan kaki inti (distribusi fluks tidak simetris) diberikan pada transformator tiga fasa. Respon tegangan primer transformator, meliputi bentuk gelombang, magnitudo, dan harmonisa, dianalisis. Diagram bifurkasi digunakan untuk mengenali secara lebih mudah karakteristik feroresonansi terhadap variasi tegangan sumber, sedangkan *fast fourier transform* (FFT) digunakan untuk mendapatkan spektrum harmonisa yang akan menunjukkan mode feroresonansi. Selanjutnya, *total harmonic distortion* (THD) dihitung berdasarkan spektrum harmonisa tersebut untuk mengetahui tingkat harmonisa tegangan ketika kondisi feroresonansi. Evaluasi hasil pengujian dilakukan dengan membandingkannya dengan hasil simulasi menggunakan ATPDraw.

## **1.3 Tujuan**

Penelitian bertujuan, antara lain:

- a. Menginisiasi fenomena feroresonansi secara fisik pada transformator tegangan rendah satu fasa dan tiga fasa.
- b. Memahami karakteristik feroresonansi akibat faktor-faktor inisiasi yang diberikan, meliputi variasi tegangan sumber, kapasitansi, pelepasan fasa, dan ketidaksimetrisan kaki inti transformator.

## **1.4 Batasan Masalah**

Rangkaian pengujian merupakan rangkaian dasar feroresonansi. Pengujian yang dilakukan tidak ditujukan untuk merusak transformator, melainkan hanya untuk mendapatkan sinyal feroresonansi pada tegangan primer

transformator. Respon feroresonansi ditandai oleh bentuk gelombang tegangan abnormal, seperti bentuk gelombang terdistorsi atau magnitudo tegangan tidak wajar (tegangan lebih atau kurang). Pengaruh kondisi inisial sistem, meliputi fluks sisa transformator, muatan kapasitor, dan sudut pembukaan pemutus daya, diabaikan. Pemodelan feroresonansi pada ATPDraw dilakukan dengan menggunakan rangkaian dan persamaan matematis sederhana. Rangkaian transformator tiga fasa dengan ketidaksimetrisan kaki inti dimodelkan sebagai susunan paralel dari tiga transformator satu fasa dengan kurva magnetisasi yang berbeda. Namun, hasil simulasi tersebut diharapkan mampu merepresentasikan hasil pengujian. Penelitian ini tidak membahas metode *fast fourier transform* (FFT) dan diagram bifurkasi secara detil. Kedua metode tersebut diterapkan hanya untuk mengenali secara lebih mudah karakteristik feroresonansi yang muncul.

## **1.5 Kontribusi**

Penelitian diharapkan agar mampu memberikan pemahaman feroresonansi secara fisik pada transformator tegangan rendah satu fasa dan tiga fasa, terutama terkait kemunculan (karakteristik) fenomena tersebut akibat faktor-faktor inisiasi yang diberikan, seperti variasi tegangan sumber, kapasitansi, pelepasan fasa, dan ketidaksimetrisan kaki inti transformator. Hasil penelitian juga dapat dijadikan sebagai acuan dalam sistem deteksi dan mitigasi feroresonansi. Selain itu, skema pengujian yang hanya melibatkan rangkaian sederhana (namun mampu merepresentasikan fenomena dan menunjukkan efek faktor inisiasi yang diberikan) dapat dikembangkan menjadi sebuah skema yang lebih kompleks dan mendekati kasus kemunculan feroresonansi di lapangan.

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

Feroresonansi merupakan fenomena resonansi non-linier yang melibatkan interaksi antara induktansi non-linier dan kapasitansi. Induktansi non-linier tersebut merupakan induktansi yang bersifat feromagnetik dan dapat bersaturasi, seperti transformator daya, transformator pengukuran, dan *shunt reactor*. Kapasitansi berasal dari kabel, saluran transmisi, *capacitive voltage transformer* (CVT), *capacitor bank*, *voltage grading capacitor* pada pemutus daya, dan *metalclad substation*.

Pada umumnya, kemunculan feroresonansi di lapangan dipicu oleh suatu pengoperasian pemutus daya, seperti pelepasan beban, *transformer energizing*, *transformer de-energizing*, dan *fault clearing*, atau gangguan yang terjadi pada jaringan listrik, seperti gangguan transien, tegangan lebih akibat sambaran petir, dan hubung singkat. Faktor pemicu tersebut akan mendorong inti transformator bersaturasi. Respon feroresonansi yang muncul dapat bertahan (*steady state*) akibat adanya sumber tegangan yang cukup untuk mengkompensasi rugi-rugi.

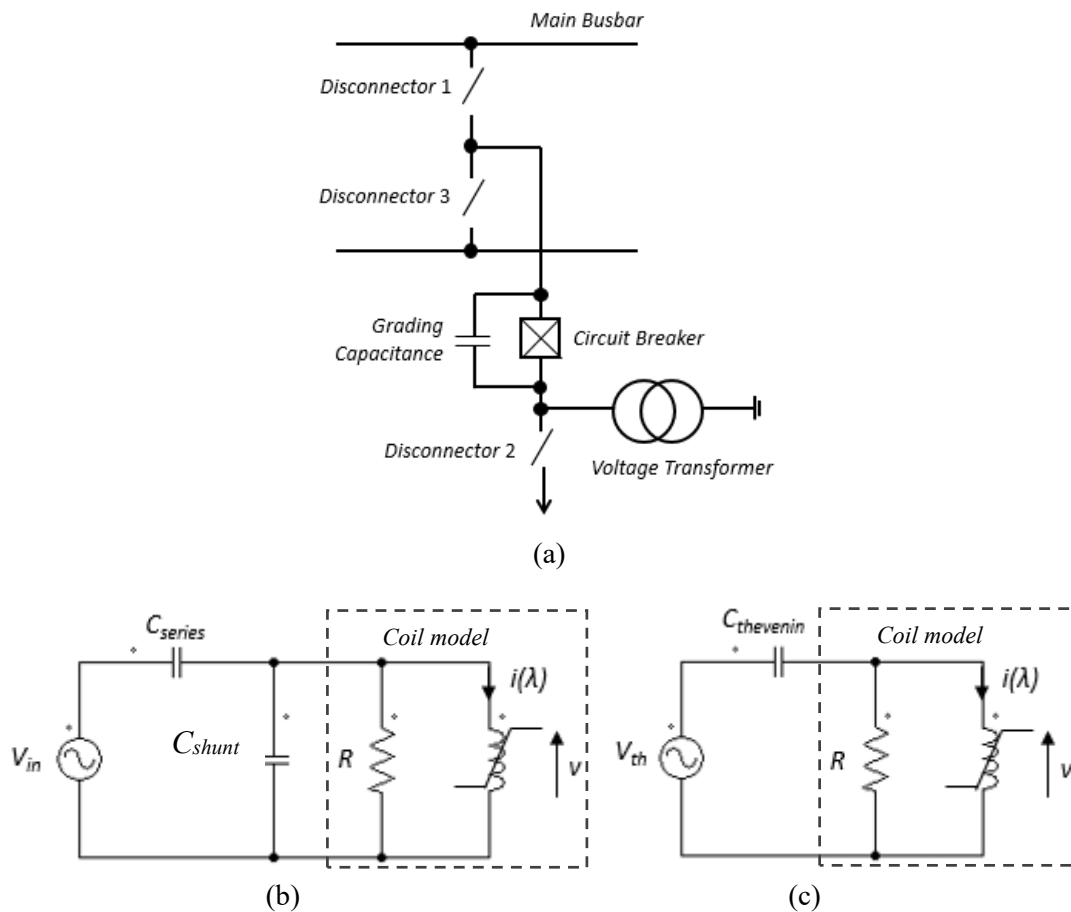
Karakteristik feroresonansi yaitu sensitif terhadap parameter dan kondisi sistem dan adanya perubahan respon secara mendadak (*jump phenomenon*) [1]. Dalam hal ini, respon suatu sistem dapat berubah secara mendadak dari respon tunak yang normal menjadi respon feroresonansi yang ditandai oleh tegangan abnormal. Dalam memahami karakteristik feroresonansi tersebut secara lebih detail dan metode analisisnya sebagai fenomena dinamis yang non-linier, paparan mengenai: a) kajian penelitian tentang pengujian inisiasi feroresonansi, b) teori dasar feroresonansi, meliputi mekanisme fisik, karakteristik, dan mode osilasi, c) diagram bifurkasi, d) *fast fourier transform* (FFT), akan dijelaskan pada bab ini.

#### 2.1 Kajian Penelitian Terkait

Salah satu contoh kasus feroresonansi di lapangan, yaitu kemunculan feroresonansi pada transformator pengukuran, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 (a). Pemodelan rangkaian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1 (b).  $V_{in}$

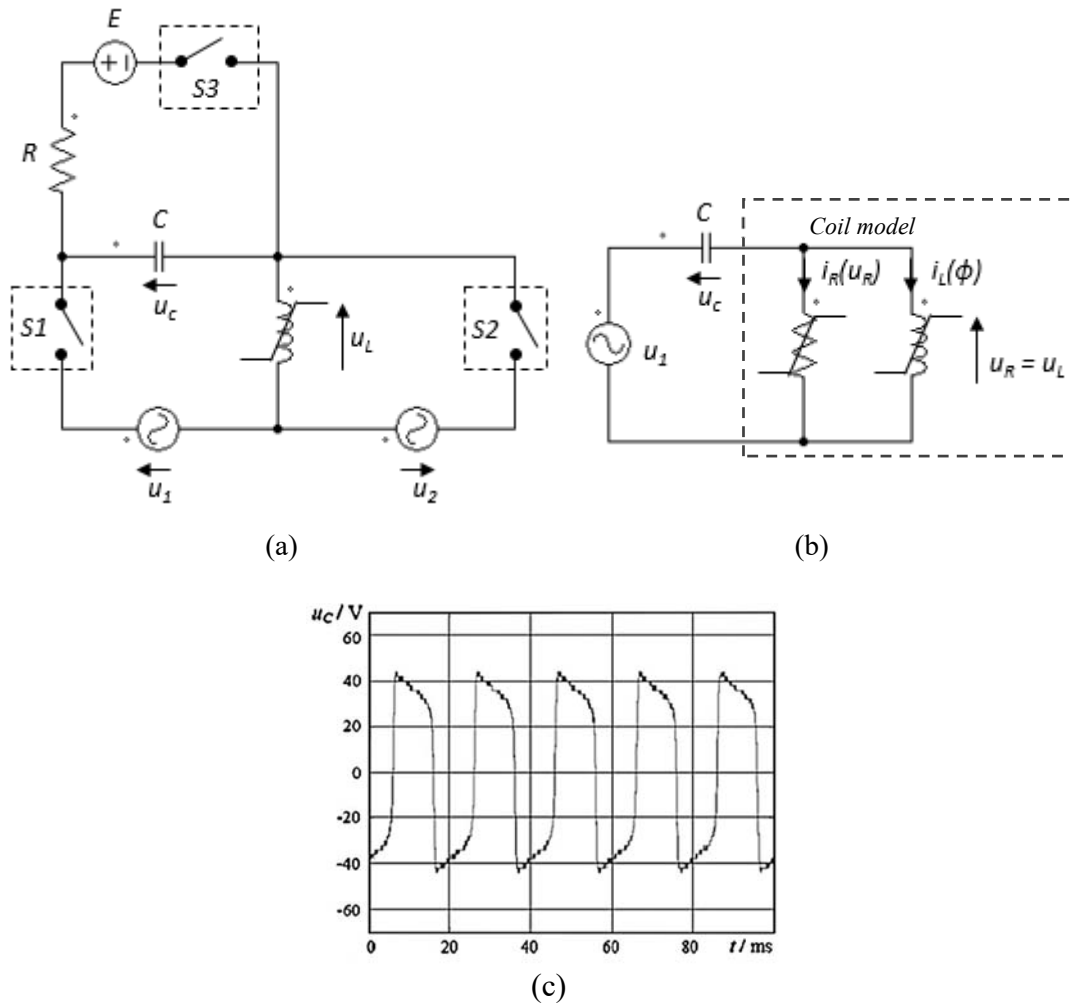
adalah tegangan bus,  $C_{series}$  adalah *grading capacitance* akibat pembukaan pemutus daya dan kapasitansi penghantar,  $C_{shunt}$  adalah kapasitansi belitan transformator dan *line charging* saluran, dan  $R$  adalah rugi-rugi. Kemudian rangkaian pada Gambar 2.1 (b) disederhanakan ke dalam rangkaian *thevenin*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 (c).  $C_{thevenin}$  merupakan hasil penjumlahan dari  $C_{series}$  dan  $C_{shunt}$ , sedangkan  $V_{th} = \frac{C_{series}}{C_{series} + C_{shunt}} V_{in}$ .

Penelitian [18] menggunakan rangkaian feroresonansi dasar yang merupakan susunan seri dari sumber tegangan sinusoidal (50 Hz), kapasitor (20 uF), dan transformator satu fasa dengan material inti tipe M5 ( $V_{primer} = 30$  V,  $S = 200$  VA). Rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.2 (a), sedangkan pemodelan rangkaian (simulasi) ditunjukkan pada Gambar 2.2 (b).

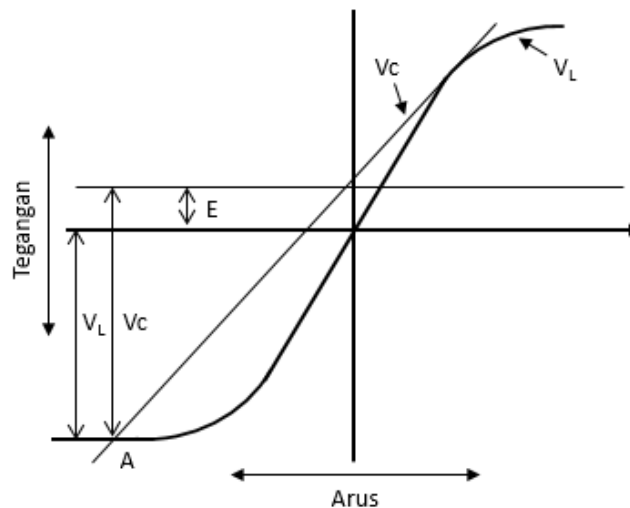


Gambar 2.1 Rangkaian Feroresonansi pada Transformator Pengukuran [15]: a) *Single Line Diagram*. b) Pemodelan. c) Rangkaian *Thevenin* (Rangkaian Dasar Feroresonansi).

Pada Gambar 2.2 (a) saklar  $S1$  berfungsi sebagai pemicu feroresonansi dan pengatur sudut penutupan pemutus daya, sedangkan saklar  $S2$  dan  $S3$  berfungsi untuk mengatur kondisi inisial sistem, seperti muatan awal kapasitor dan fluks sisa transformator. Pada Gambar 2.2 (b) sisi primer transformator dimodelkan sebagai induktansi linier *piece-wise*,  $i_L(\varphi)$ , yang merepresentasikan efek saturasi inti, sedangkan rugi-rugi dimodelkan sebagai resistansi non-linier,  $i_R(u_R)$ . Hasil penelitian [18,20,21] menunjukkan bahwa kondisi inisial sistem mempengaruhi respon feroresonansi yang muncul. Contoh bentuk gelombang feroresonansi yang diamati pada kapasitor ditunjukkan pada Gambar 2.2 (c).



Gambar 2.2 Feroresonansi [18]: a) Rangkaian Pengujian. b) Pemodelan. c) Gelombang Feroresonansi Berdasarkan Hasil Pengujian Tegangan Sumber 12 V.

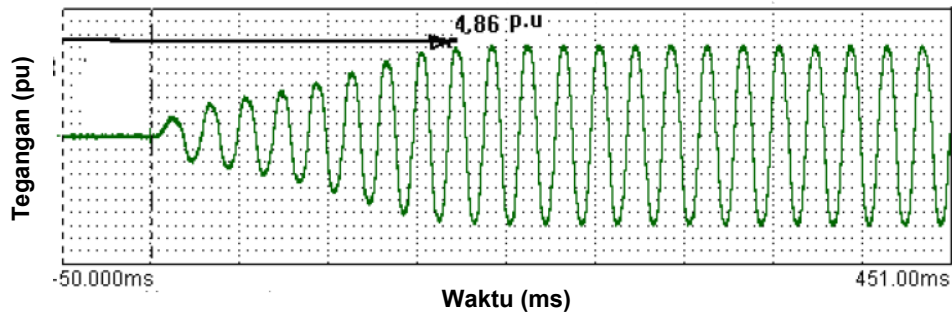


Gambar 2.3 Hubungan antara Kapasitansi dan Induktansi Non-Linier dalam Grafik *Rudenberg* [16]

Pada pengujian [22] inisiasi feroresonansi dilakukan pada transformator tegangan rendah satu fasa dengan inti toroidal dan jenis material M5. Variasi kapasitansi yang digunakan, antara lain: 10  $\mu\text{F}$ , 15  $\mu\text{F}$ , 20  $\mu\text{F}$ , 25  $\mu\text{F}$ , dan 30  $\mu\text{F}$ , sedangkan transformator yang diuji memiliki daya nominal sebesar 200 VA dengan *tapping* sebesar 24 V, 27 V, 30 V, dan 36 V. Variasi tegangan sumber dilakukan dengan menaikkan tegangan secara bertahap (0.4 V per *step*) dan kontinu hingga mencapai sekitar dua kali dari tegangan nominal transformator. Kemudian tegangan sumber diturunkan hingga bernilai nol.

Respon feroresonansi yang terekam pada tegangan kapasitor, yaitu besar tegangan yang melebihi tegangan sumber dan kemunculan beberapa mode feroresonansi, seperti fundamental, subharmonik, dan mode kompleks lainnya. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa: a) peningkatan nilai kapasitansi menyebabkan respon feroresonansi semakin terlihat, b) semakin besar tegangan nominal transformator menyebabkan kemunculan feroresonansi terjadi pada nilai tegangan sumber yang lebih besar, c) peningkatan tegangan sumber akan memperbesar kemungkinan inisiasi feroresonansi [15,20,21].

Penentuan nilai kapasitansi yang mampu memberikan respon feroresonansi dengan efek tegangan lebih dijelaskan melalui *Rudenberg's graphical method* [16], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada gambar tersebut reaktansi kapasitif direpresentasikan oleh kemiringan kurva  $V_c$ ,



Gambar 2.4 Gelombang Tegangan Kapasitor Kondisi Ferroresonansi Berdasarkan Pengujian dengan Tegangan Sumber Sebesar Tegangan Nominal Transformator [16]

sedangkan reaktansi induktif non-linier direpresentasikan oleh kurva  $V_L$ . Tegangan sumber ditunjukkan oleh garis horisontal yang bernilai  $E$  dari sumbu pusat. Perpotongan antara kurva linier  $V_C$ , kurva non-linier  $V_L$ , dan garis horisontal  $E$  dengan kurva linier  $V_C$  menyinggung area saturasi pada kurva  $V_L$  di kuadran satu akan memberikan titik  $A$ . Titik  $A$  tersebut menunjukkan tegangan dan arus kapasitor yang mampu menginisiasi respon ferroresonansi dengan efek tegangan lebih. Selanjutnya, nilai kapasitansi dicari melalui Persamaan 2.1. Respon ferroresonansi yang diperoleh berdasarkan besar kapasitansi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.4.

$$C = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot V_C} \quad (2.1)$$

dengan:

$C$  = kapasitansi (F),

$I$  = arus kapasitor (A),

$f$  = frekuensi fundamental (50 Hz),

$V_C$  = tegangan kapasitor (V).

## 2.2 Teori Dasar

### 2.2.1 Mekanisme Fisik Resonansi

Resonansi listrik adalah fenomena osilasi pada rangkaian arus bolak-balik yang memiliki komponen induktansi dan kapasitansi. Resonansi ini dapat terjadi pada semua tingkat tegangan. Berdasarkan susunan induktor dan kapasitor,

resonansi terbagi menjadi dua macam, yaitu resonansi seri dan resonansi paralel. Jika komponen induktor dan kapasitor tersusun seri maka resonansi tergolong seri, sedangkan resonansi paralel terjadi pada rangkaian dengan komponen induktor dan kapasitor tersusun paralel.

Gambar 2.5 (a) menunjukkan rangkaian resonansi seri. Hubungan vektor dari persamaan tegangan pada gambar tersebut dituliskan sebagai berikut:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C \quad (2.2)$$

dengan:

$\vec{U}$  = tegangan sumber (V),

$\vec{U}_R$  = tegangan resistor (V),

$\vec{U}_L$  = tegangan induktor (V),

$\vec{U}_C$  = tegangan kapasitor (V).

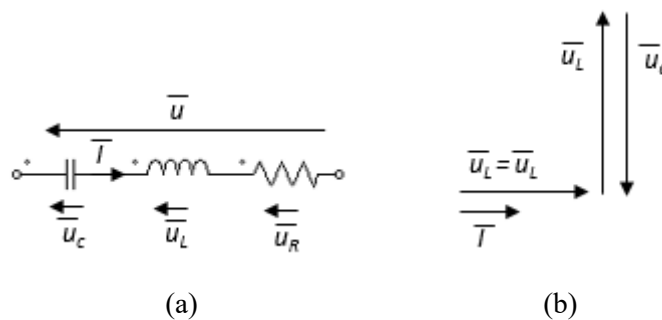
Ketika kondisi resonansi, tegangan pada kapasitor dan induktor terkompensasi, sehingga tegangan sumber sama dengan tegangan resistor, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.5 (b). Selanjutnya, hubungan antara reaktansi induktif dan kapasitif diperoleh sebagai berikut:

$$X_L = X_C \quad (2.3)$$

dengan:

$X_L$  = reaktansi induktif ( $\Omega$ ),

$X_C$  = reaktansi kapasitif ( $\Omega$ ).



Gambar 2.5 Resonansi Seri [1]: a) Rangkaian. b) Vektor Tegangan dan Arus.



Dalam hal ini, syarat resonansi terjadi, yaitu:

$$L C \omega_n^2 = 1 \quad (2.4)$$

dengan:

$L$  = induktor (H),

$C$  = kapasitor (F),

$\omega_n$  = kecepatan sudut (rad/s).

Persamaan impedansi pada Gambar 2.5 (a) adalah:

$$Z = R + jX \quad (2.5)$$

dengan:

$Z$  = impedansi ( $\Omega$ ),

$R$  = resistansi ( $\Omega$ ),

$X$  = reaktansi ( $\Omega$ ).

Ketika kondisi resonansi, kompensasi antara induktor dan kapasitor menyebabkan reaktansi,  $jX$ , bernilai nol. Kemudian reaktansi yang bernilai nol tersebut menghasilkan nilai impedansi yang minimum. Ketika nilai impedansi bernilai minimum maka nilai arus,  $I$ , akan mencapai maksimum.

### 2.2.2 Mekanisme Fisik Feroresonansi

Berikut adalah perbedaan utama antara rangkaian feroresonansi dengan resonansi [1]:

- Kemunculan feroresonansi dapat terjadi pada berbagai kisaran nilai kapasitansi.
- Frekuensi gelombang tegangan dan arus dapat berbeda dari sumber tegangan.
- Dengan konfigurasi dan nilai parameter rangkaian yang sama, respon *steady state* yang muncul dapat berupa respon yang normal atau abnormal. Muatan awal kapasitor, fluks sisa pada transformator, dan pengoperasian pemutus daya menentukan respon *steady state* yang akan muncul.

Mekanisme fisik feroresonansi diilustrasikan pada Gambar 2.6 (a). Pada rangkaian tersebut, rugi-rugi diasumsikan bernilai nol (diabaikan). Kurva magnetisasi inti besi yang telah disederhanakan,  $\phi(i)$ , ditunjukkan pada Gambar 2.6 (b). Bentuk gelombang pada Gambar 2.6 (c) adalah tipikal dari feroresonansi yang periodik.

Tegangan inisial kapasitor diasumsikan adalah  $V_0$ . Pada waktu  $t_0$ , saklar  $K$  ditutup. Arus,  $I$ , akan mengalir pada rangkaian dan berosilasi pada frekuensi  $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ . Fluks pada koil dan tegangan kapasitor dituliskan sebagai:

$$\phi = (V_0/\omega_1) \sin \omega_1 t \quad (2.6)$$

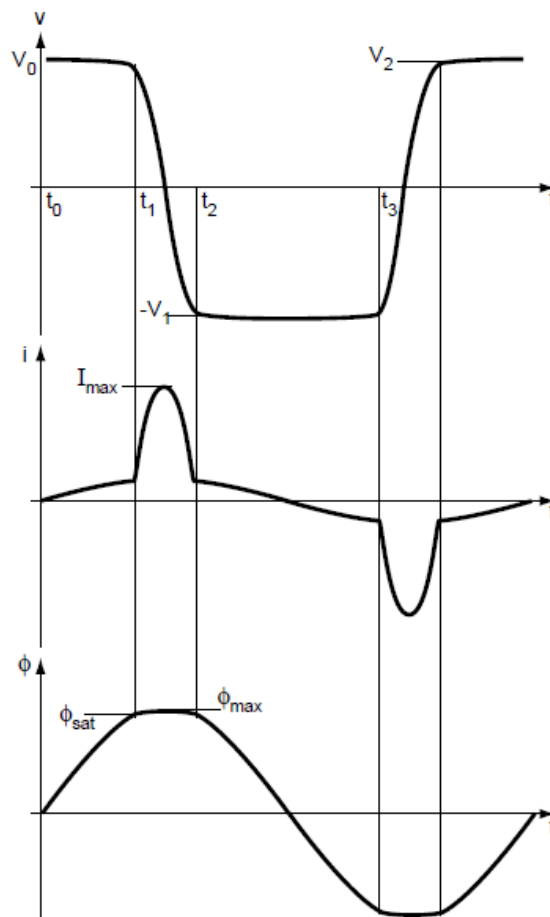
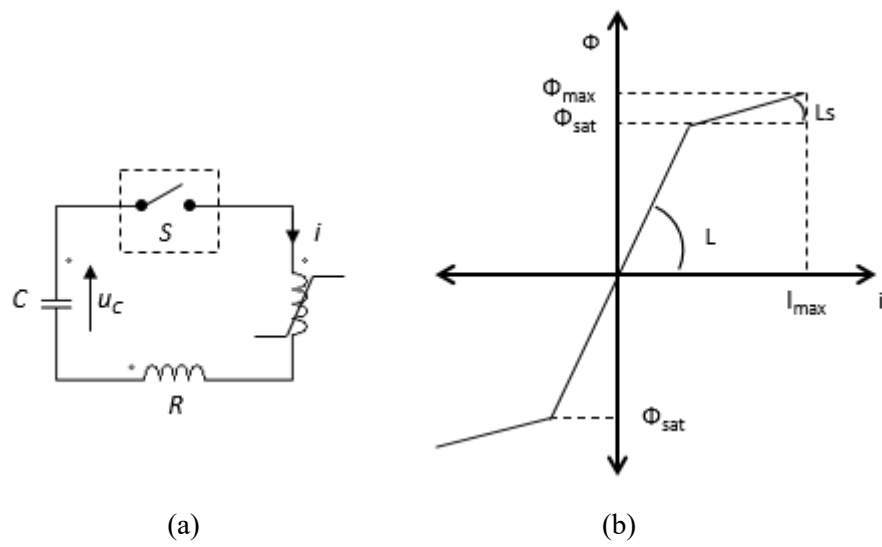
$$V = V_0 \cos \omega_1 t \quad (2.7)$$

Pada saat  $t_1$ , nilai  $(V_0/\omega_1) > \phi_{saturasi}$  sehingga fluks,  $\phi$ , mencapai saturasi. Hal ini menyebabkan induktansi sama dengan  $L_s$  dan tegangan kapasitor sama dengan  $V_1$ . Sebagaimana nilai induktansi  $L_s$  lebih kecil daripada induktansi  $L$ , kapasitor mengalami pelepasan muatan secara tiba-tiba melalui koil dalam bentuk osilasi  $\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C}$ . Selanjutnya, arus dan tegangan akan mencapai puncaknya ketika energi yang tersimpan pada koil ekuivalen dengan energi elektrostatik  $\left(\frac{1}{2}\right) CV_1^2$  yang dikembalikan oleh kapasitor.

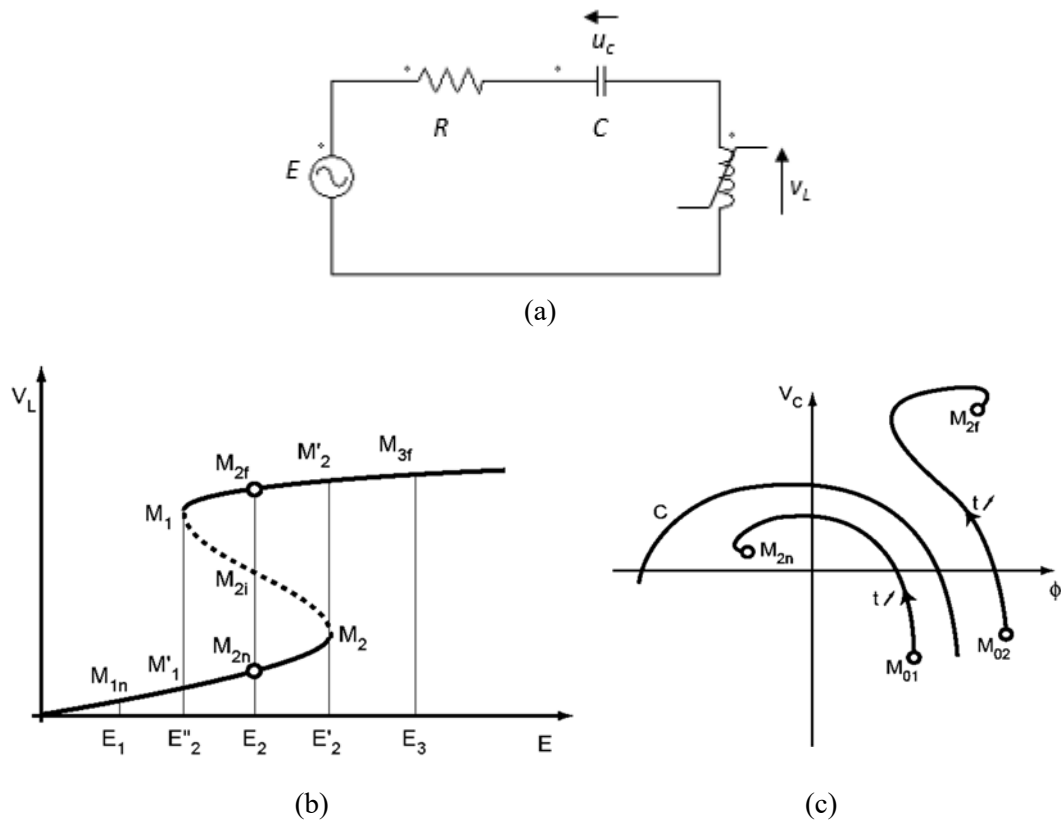
Seketika  $t_2$ , fluks kembali pada nilai  $\phi_{saturasi}$ . Hal ini menjadikan induktansi bernilai  $L$ . Dengan asumsi bahwa rugi-rugi rangkaian adalah nol, tegangan kapasitor bernilai sama dengan  $-V_1$ . Seketika  $t_3$ , fluks mencapai nilai  $-\phi_{saturasi}$  dan tegangan kapasitor sama dengan  $-V_2$ .

Sebagaimana  $\omega_1$  dalam praktisnya bernilai sangat kecil, tegangan kapasitor diasumsikan  $V_2 \approx V_1 \approx V_0$ . Dengan begitu, periode osilasi,  $T$ , berada di antara  $2\pi\sqrt{LC}$  dalam kasus non-saturasi dan  $2\pi\sqrt{LC} + 2(t_3 - t_2)$  dalam kasus saturasi ( $t_3 - t_2 \approx 2 \phi_{saturasi}/V_0$ ). Frekuensi tersebut berkisar pada  $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}}$ . Frekuensi inisial bergantung pada  $\phi_{saturasi}$ , seperti ketidaklinieran induktansi dan tegangan inisial kapasitor,  $V_0$ .

Apabila rugi-rugi rangkaian diperhitungkan maka tegangan kapasitor akan menurun ( $V_2 < V_1 < V_0$ ). Selanjutnya, penurunan tegangan tersebut menimbulkan penurunan frekuensi karena adanya variasi fluks,  $\Delta\phi$ , selama periode non-saturasi ( $t_3 - t_2$ ), yaitu  $\Delta\phi = 2 \phi_{saturasi} = \int_{t_2}^{t_3} v dt$ . Apabila rugi-rugi dikompensasi oleh sumber tegangan, frekuensi osilasi yang menurun dapat bertahan pada frekuensi sumber atau bahkan pada frekuensi *sub-multiple* dari frekuensi sumber.



Gambar 2.6 Feroresonansi [1]: a) Rangkaian Seri. b) Karakteristik Fluks. c) Tegangan, Arus dan Fluks sebagai Fungsi Waktu.



Gambar 2.7 Ilustrasi Karakteristik Feroresonansi [1]: a) Rangkaian Seri. b) Sensivitas terhadap Parameter Sistem dan Fenomena Non-Linier (*Jump Phenomenon*). c) Sensivitas terhadap Kondisi Inisial.

### 2.2.3 Karakteristik Feroresonansi

Gambar 2.7 (a) menunjukkan rangkaian dasar dari feroresonansi seri. Kurva pada Gambar 2.7 (b) mendeskripsikan tegangan puncak induktor non-linier,  $V_L$ , sebagai fungsi puncak tegangan sumber sinusoidal. Dengan meningkatkan tegangan  $E$  secara bertahap dari nol, kurva pada Gambar 2.7 (b) menunjukkan ada tiga kemungkinan tipe karakteristik (respon) berbeda yang muncul, sebagaimana dikenal sebagai *jump phenomenon* [1].

Ketika  $E = E_1$ , hanya ada satu kemungkinan respon yang muncul, yaitu  $M_{1n}$ .  $M_{1n}$  tergolong respon yang normal (diperoleh dari asumsi linier). Ketika  $E = E_2$ , ada tiga kemungkinan, yaitu  $M_{2n}$ ,  $M_{2i}$  dan  $M_{2f}$ . Respon  $M_{2n}$  merupakan respon normal, sedangkan  $M_{2f}$  merupakan respon feroresonansi yang stabil. Kurva pada Gambar 2.7 (b) yang berupa garis titik-titik, seperti pada  $M_{2i}$ , merupakan respon feroresonansi yang tidak stabil. Ketika  $E = E_3$ , hanya terdapat

satu respon feroresonansi yang muncul. Selanjutnya, apabila nilai  $E$  diturunkan dari  $E_3$ , respon akan berpindah secara mendadak dari  $M_1$  ke  $M'_1$ .

*Jump phenomenon* juga dapat diperoleh dengan memperhitungkan parameter sistem lainnya, seperti resistansi atau kapasitansi. Adanya sedikit variasi pada nilai parameter sistem atau gangguan transien dapat menyebabkan perpindahan (*jump*) secara mendadak di antara dua *steady state* stabil yang sangat berbeda.

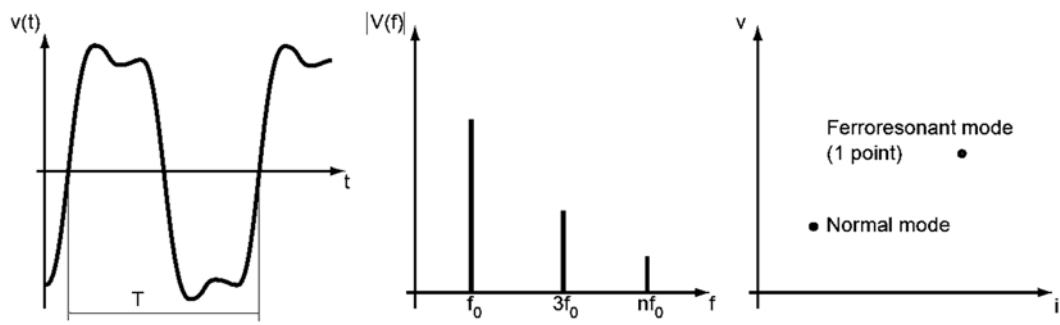
$M_{2n}$  atau  $M_{2f}$  bergantung dari kondisi inisial sistem. Gambar 2.7 (c) mengilustrasikan lintasan transien dari fluks,  $\phi$ , dan tegangan kapasitor,  $V_C$ , sebagai fungsi waktu untuk kondisi inisial yang berbeda, yaitu  $M_{01}$  dan  $M_{02}$ . Kurva C mendeskripsikan sebuah batas. Apabila kondisi inisial, seperti fluks sisa dan tegangan kapasitor, berada pada sisi dalam kurva C maka respon sistem akan konvergen ke  $M_{2n}$ . Sebaliknya, apabila kondisi inisial berada pada sisi luar kurva C maka respon akan konvergen ke  $M_{2f}$ . Sebagaimana titik  $M_{2i}$  terdapat pada batas, *steady state* yang mencapai sekitar titik ini akan sangat sensitif terhadap kondisi inisial.

#### 2.2.4 Mode Feroresonansi

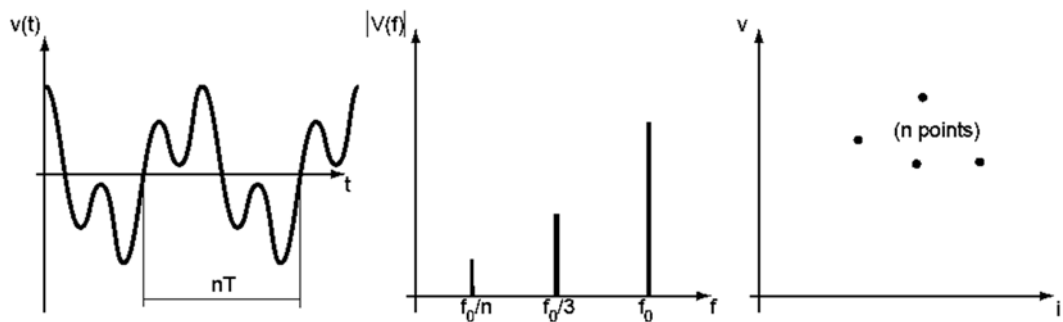
Mode osilasi feroresonansi bergantung pada kondisi inisial sistem. Dalam hal ini, beberapa mode osilasi dapat muncul untuk parameter sistem yang sama. Pada dasarnya, beberapa mode osilasi tersebut diklasifikasikan ke dalam empat macam respon *steady state*, antara lain:

##### a. Mode Fundamental

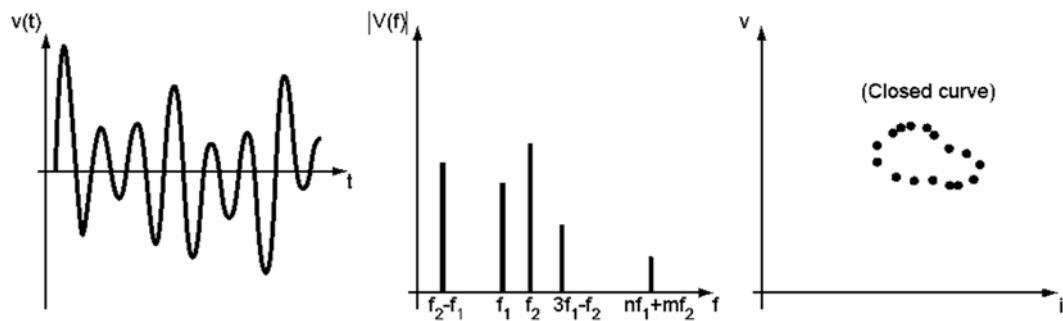
Pada mode ini gelombang arus dan tegangan adalah periodik dengan periode yang sama dengan sistem dan dapat disertai dengan tingkat harmonik tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Spektrum sinyal yang muncul tergolong diskontinyu yang terdiri dari frekuensi fundamental sumber,  $f_0$ , dan frekuensi harmonik,  $2f_0$ ,  $3f_0$  dan seterusnya.



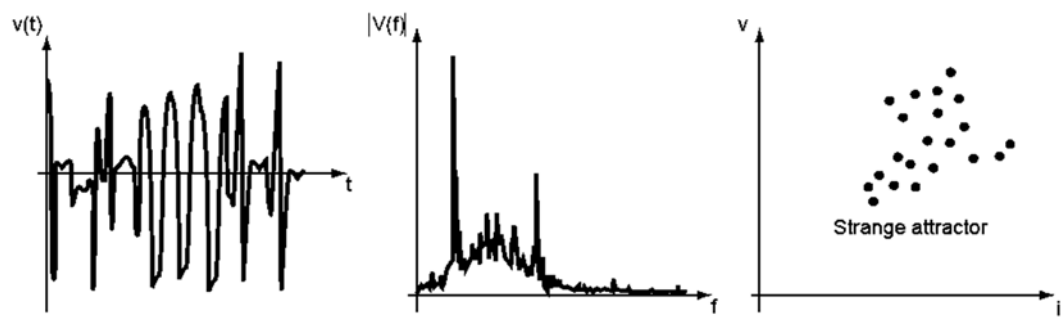
Gambar 2.8 Karakteristik Ferroresonansi Mode Fundamental [1]



Gambar 2.9 Karakteristik Ferroresonansi Mode Subharmonik [1]



Gambar 2.10 Karakteristik Ferroresonansi Mode Quasi-Periodik [1]



Gambar 2.11 Karakteristik Ferroresonansi Mode Chaotik [1]

#### b. Mode Subharmonik

Karakteristik mode subharmonik ditunjukkan pada Gambar 2.9. Respon gelombang memiliki periode  $nT$  yang merupakan kelipatan dari periode sumber. Spektrum sinyal menunjukkan sebuah frekuensi fundamental,  $f_0/n$  ( $f_0$  adalah frekuensi sumber dan  $n$  adalah bilangan integer) dan disertai tingkat harmonik tertentu.

#### c. Mode Quasi-periodik

Mode feroresonansi ini tergolong non-periodik, seperti terlihat pada Gambar 2.10. Spektrum yang muncul merupakan spektrum diskontinu yang memiliki frekuensi  $nf_1 + mf_2$ , dengan  $n$  dan  $m$  adalah bilangan integer dan  $f_1/f_2$  adalah bilangan real irrasional.

#### d. Mode Chaotik

Mode chaotik memiliki spektrum sinyal yang kontinu dan non-periodik, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11. Sinyal tersebut berbentuk tidak beraturan, tidak dapat diprediksi dan diinterupsi oleh frekuensi apapun.

### 2.2.5 Diagram Bifurkasi

Bifurkasi didefinisikan sebagai perubahan kestabilan dalam dinamika suatu sistem akibat perubahan nilai parameter sistem. Diagram bifurkasi memuat sebuah plot yang mengindikasikan perilaku kondisi tunak dari suatu sistem pada rentang nilai-nilai parameter sistem yang diberikan [23]. Metode ini diadopsi untuk analisis feroresonansi dalam memahami karakteristik sistem dan untuk meringkas analisis parameter yang panjang (banyak data) ke dalam sebuah grafik atau plot tunggal [24]. Diagram bifurkasi telah dibuktikan sebagai metode penyelesaian yang sesuai untuk kasus-kasus feroresonansi (sebagai sistem dinamis yang non-linier) [5,24-29]. Penggunaan diagram bifurkasi dalam analisis feroresonansi ditunjukkan pada Gambar 2.12.

### 2.2.6 Fast Fourier Transform (FFT)

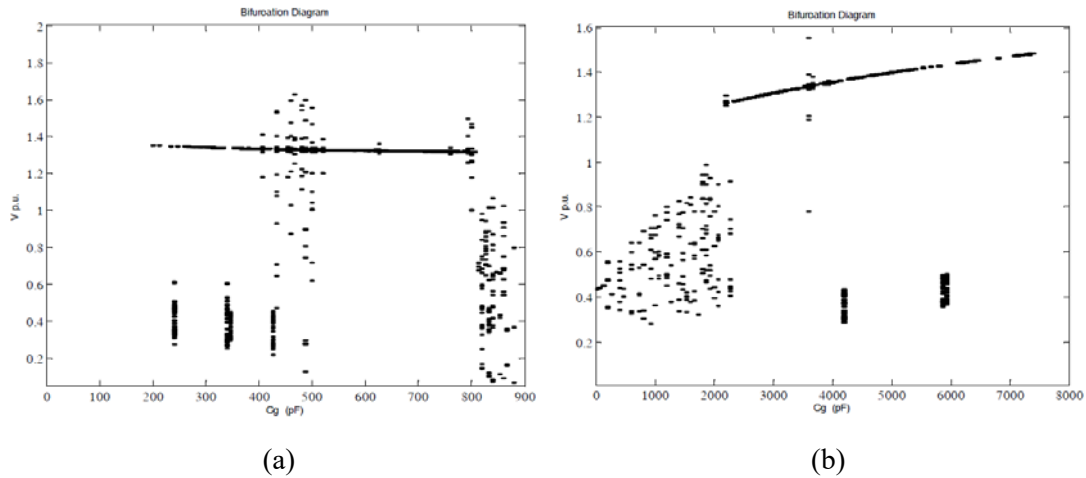
Menurut metode *fourier*, suatu fungsi dapat diuraikan menjadi fungsi-fungsi sinusoidal dengan frekuensi, amplitudo, dan sudut fasa tertentu apabila fungsi tersebut adalah periodik [30]. Transformasi *fast fourier* (FFT) adalah implementasi diskrit dari metode *fourier*. FFT bertujuan untuk menguraikan frekuensi-frekuensi yang terdapat dalam sinyal domain waktu ke dalam sejumlah garis-garis frekuensi atau batang frekuensi (spektrum frekuensi). Kemudian nilai *total harmonic distortion* (THD) dihitung berdasarkan spektrum frekuensi tersebut sesuai persamaan berikut:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (2.8)$$

dengan:

$V_i$  = amplitudo frekuensi harmonisa tegangan ke- $i$ ,

$n$  = jumlah data frekuensi harmonisa.



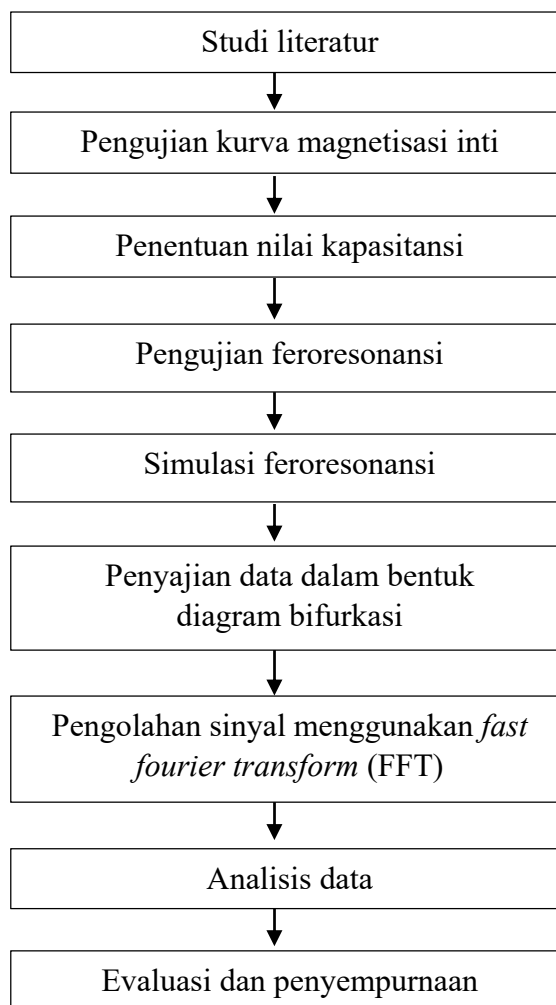
Gambar 2.12 Karakteristik Diagram Bifurkasi [29]: a) Kapasitansi *Stray*. b) Kapasitansi *Grading*.



## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk menginisiasi fenomena feroresonansi secara fisik dan memahami karakteristik respon feroresonansi yang muncul. Agar tujuan tersebut tercapai, penelitian dilaksanakan berdasarkan tahapan-tahapan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Alur Pelaksanaan Penelitian Secara Umum

### 3.1 Pengujian Kurva Magnetisasi Inti

Pada dasarnya, feroresonansi adalah sebuah interaksi pada inti transformator. Di samping itu, pada penelitian ini transformator dalam kondisi tanpa beban (*open loop*), sehingga rugi-rugi belitan sangat rendah. Hal ini berarti bahwa rangkaian transformator dapat dimodelkan sebagai inti transformator saja. Dalam memodelkan inti sebagai induktansi non-linier, parameter yang diperlukan adalah kurva magnetisasi inti transformator.

Praktisnya, kurva magnetisasi inti menggambarkan hubungan antara arus magnetisasi ( $I_m$ ) dengan *flux linkage* ( $\lambda$ ). Untuk mendapatkan kurva tersebut, pengujian tanpa beban dilakukan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Tegangan primer dinaikkan secara bertahap hingga melebihi tegangan nominalnya (inti transformator bersaturasi). Besar arus dan daya primer dicatat untuk setiap nilai tegangan yang diberikan. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut digunakan untuk mendapatkan arus magnetisasi dan *flux linkage* serta arus rugi-rugi berdasarkan persamaan-persamaan berikut:

$$PF = \cos \theta = \frac{P_p}{V_p \cdot I_p} \quad (3.1)$$

$$I_m = I_p \cdot \sin \theta \quad (3.2)$$

$$I_c = I_p \cdot \cos \theta \quad (3.3)$$

$$L_m = \frac{V_p}{I_p \cdot 2\pi \cdot f} \quad (3.4)$$

$$\lambda = I_m \cdot L_m \quad (3.5)$$

dengan:

$P_p$  = daya sisi primer (W),

$V_p$  = tegangan sisi primer (V),

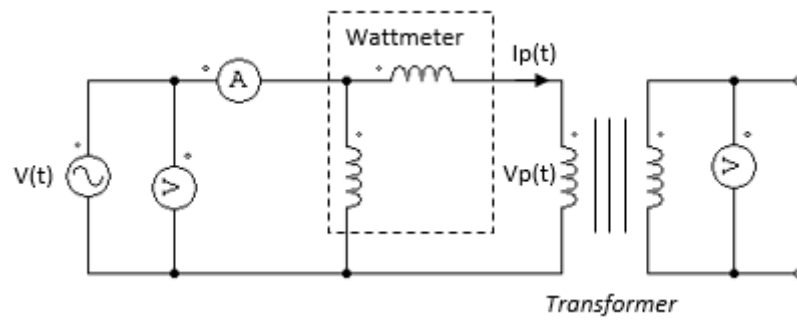
$I_p$  = arus sisi primer (A),

$I_c$  = arus rugi-rugi (A),

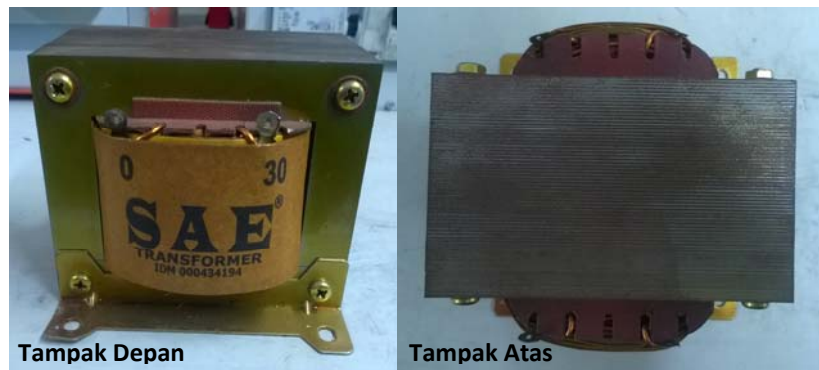
$I_m$  = arus magnetisasi (A),

$L_m$  = induktansi inti transformator (H),

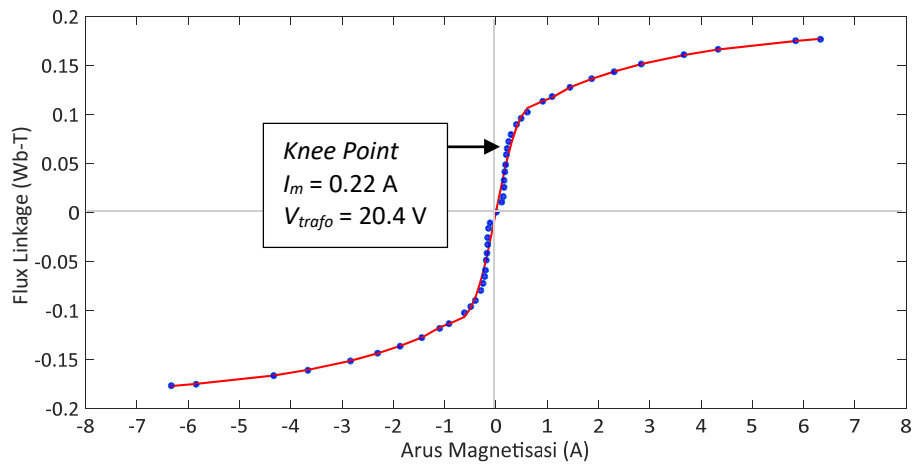
$\lambda$  = *flux linkage* (Wb-T).



Gambar 3.2 Rangkaian Pengujian Tanpa Beban [31]



(a)



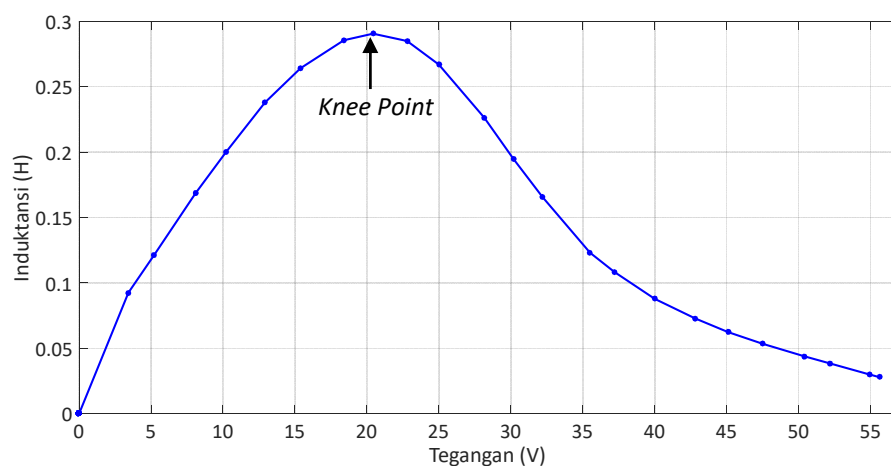
(b)

Gambar 3.3 Transformator Satu Fasa: a) Fisik. b) Kurva Magnetisasi Inti.

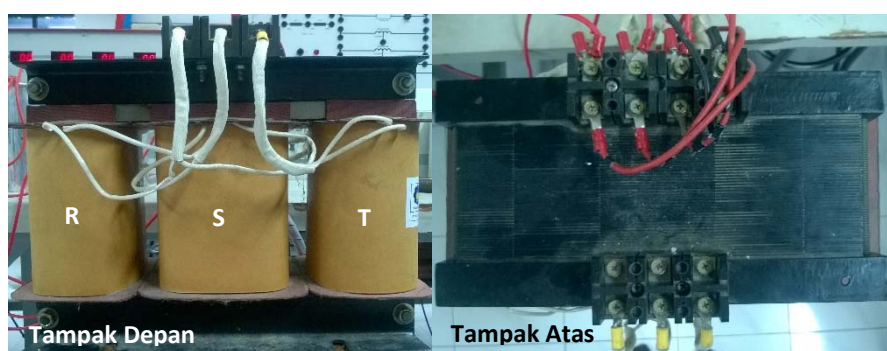
Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan.

Spesifikasi transformator satu fasa yang diuji dapat dilihat pada Gambar 3.3 (a), sedangkan hasil pengujian kurva magnetisasi inti transformator tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.3 (b). Pada kurva yang diperoleh area non-saturasi

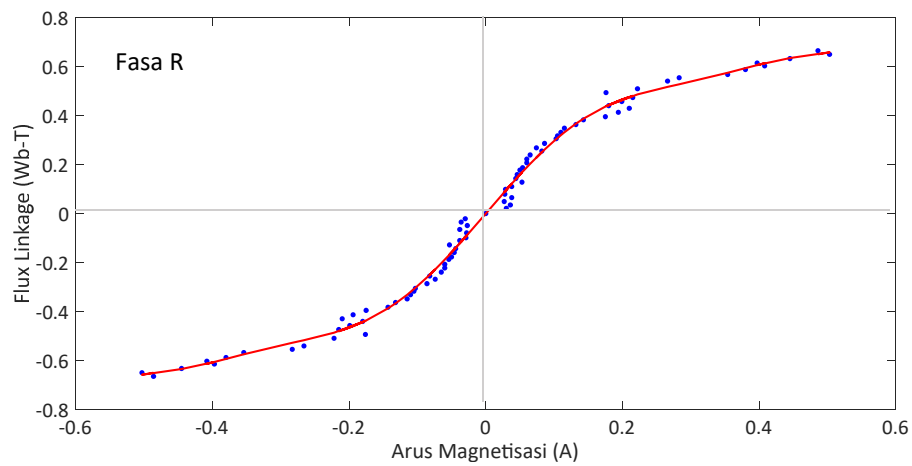
yang ditandai oleh bentuk kurva curam (mendekati bentuk vertikal) dan saturasi yang ditandai oleh bentuk kurva landai (mendekati bentuk horisontal) dapat diamati secara jelas. Nilai arus maksimal saat kondisi saturasi adalah sekitar 6 A. Meskipun arus nominal transformator yang diuji adalah 7 A, besar arus maksimal sebesar 6 A tersebut sudah mampu menunjukkan kondisi saturasi. Di samping itu, pemberian tegangan transformator memang dibatasi hingga sekitar 57 V agar arus yang mengalir tidak melebihi arus nominal sumber tegangan (*variac*) yaitu sebesar 6.5 A.



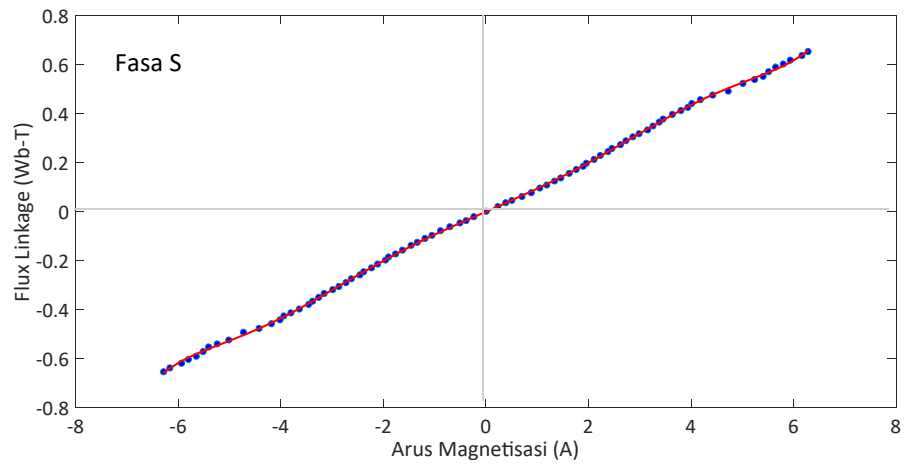
Gambar 3.4 Kecenderungan Nilai Induktansi terhadap Tegangan Primer Transformator Satu Fasa



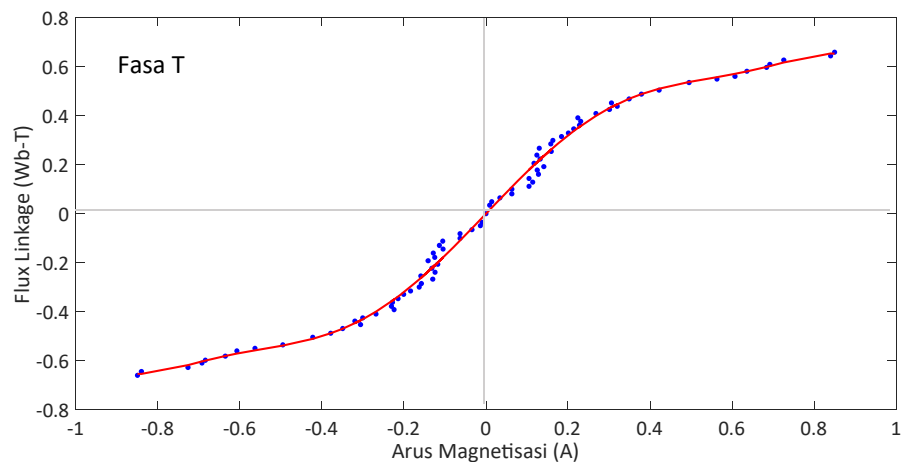
(a)



(b)

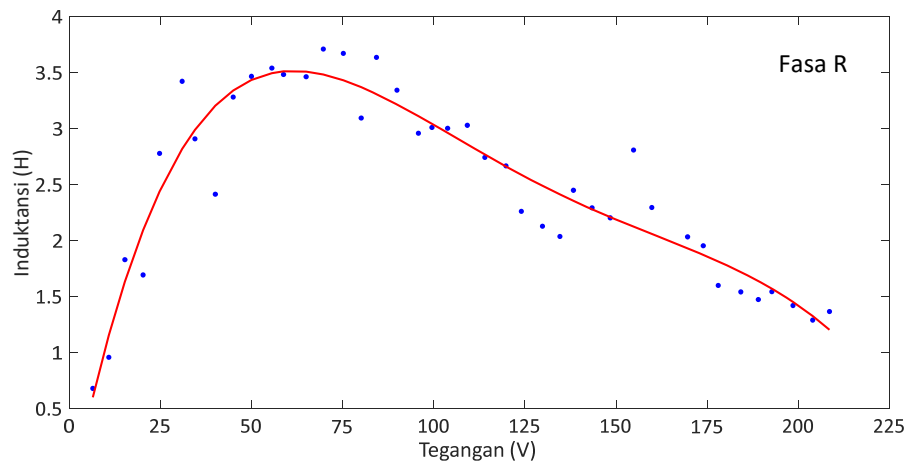


(c)

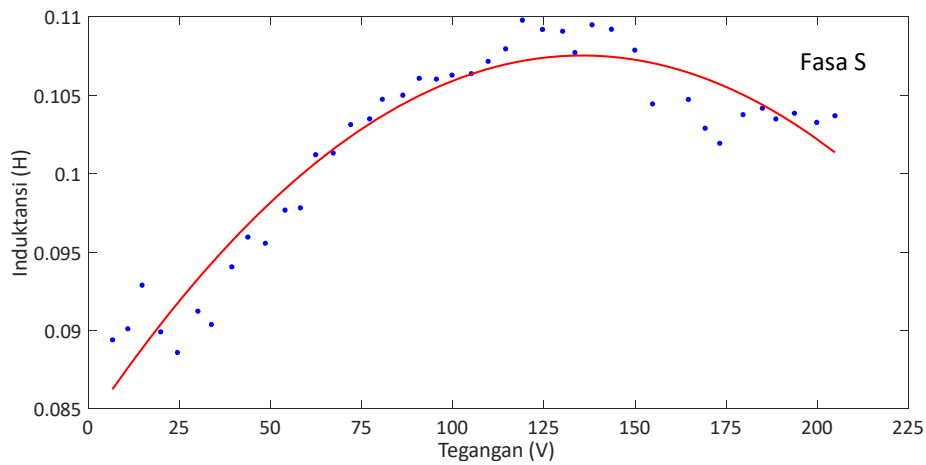


(d)

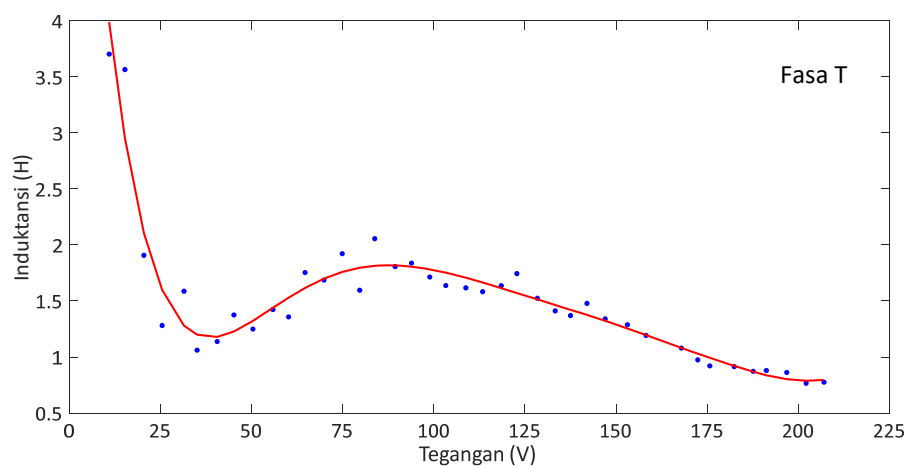
Gambar 3.5 Transformator Tiga Fasa: a) Fisik b) Kurva Magnetisasi Fasa R. c) Kurva Magnetisasi Fasa S. d) Kurva Magnetisasi Fasa T. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.6 Kecenderungan Induktansi pada Transformator Tiga Fasa: a) Fasa R. b) Fasa S. c) Fasa T. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan.

Kemiringan kurva magnetisasi inti merepresentasikan nilai induktansi transformator. Semakin curam bentuk kurva maka semakin besar induktansi, dan berlaku sebaliknya. Kecenderungan nilai induktansi terhadap tegangan pada transformator satu fasa dapat dilihat pada Gambar 3.4. Nilai induktansi mengalami peningkatan pada tegangan sekitar 0 - 21 V. Kemudian nilai induktansi mengalami penurunan seiring dengan pemberian tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa titik saturasi dimulai pada tegangan senilai 20.4 V (*knee point*) meskipun tegangan nominal transformator adalah 30 V. *Knee point* tersebut juga dapat diamati pada Gambar 3.3. Di samping itu, besar kenaikan dan penurunan nilai induktansi terlihat tidak linier terhadap tegangan. Hal ini diamati dari kemiringan kurva induktansi yang tidak berbentuk garis lurus (linier).

Spesifikasi transformator tiga fasa yang diuji ditunjukkan pada Gambar 3.5 (a), sedangkan hasil pengujian kurva magnetisasi inti pada transformator tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.5 (b) – (d). Kurva yang diperoleh telah mempertimbangkan fluks mutual karena pengujian dilakukan dengan pemberian tegangan tiga fasa pada sisi primer transformator. Bentuk kurva magnetisasi fasa R terlihat mirip dengan fasa T, sedangkan bentuk kurva magnetisasi fasa S terlihat sangat berbeda dibandingkan dengan lainnya. Dengan pemberian tegangan fasa hingga sebesar tegangan nominal transformator (sekitar 220 V), area saturasi pada kurva magnetisasi fasa R dan T dapat diamati sedangkan kurva magnetisasi fasa S masih berupa garis linier (area non-saturasi). Hasil ini dapat dijelaskan oleh kaki fasa S yang paling besar dibandingkan dengan dua kaki lainnya.

Kecenderungan nilai induktansi terhadap tegangan primer transformator tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 3.6. Secara umum, nilai induktansi pada ketiga fasa mengalami peningkatan hingga tegangan tertentu, seperti fasa R pada tegangan sekitar 70 V, fasa S pada tegangan sekitar 130 V, dan fasa T pada tegangan sekitar 80 V. Kemudian nilai induktansi mengalami penurunan seiring dengan pemberian tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa titik saturasi pada setiap fasa dimulai pada besar tegangan tersebut (*knee point*).

Apabila kurva induktansi pada setiap fasa diamati secara lebih detil maka besar peningkatan dan penurunan induktansi terlihat berbeda. Pada Gambar 3.6 (b) nilai induktansi meningkat dari 0.68 H pada tegangan 6.5 V hingga 3.7 H pada

tegangan 69.7 V. Kemudian nilai induktansi menurun secara signifikan hingga bernilai 1.29 H pada tegangan 203.9 V.

Pada Gambar 3.6 (c) nilai induktansi meningkat dari 0.089 H pada tegangan 6.7 V hingga 0.1094 H pada tegangan 138.2 V. Kemudian nilai induktansi mengalami sedikit penurunan hingga bernilai 0.1032 H pada tegangan 199.8 V. Pada Gambar 3.6 (d) nilai induktansi justru menurun dari 3.7 H pada tegangan 6.6 V hingga bernilai 1.060 H pada tegangan 35.1 V. Selanjutnya nilai induktansi mengalami peningkatan hingga bernilai 2.056 H pada tegangan 83.8 V. Lalu nilai induktansi mengalami penurunan kembali hingga bernilai 0.7661 H pada tegangan 202.1 V. Hasil ini menjelaskan bahwa ketidaklinieran induktansi pada transformator tiga fasa sangat terlihat jelas pada fasa R dan T.

### 3.2 Penentuan Nilai Kapasitansi

Rangkaian dasar feroresonansi merupakan susunan seri dari transformator (sebagai induktansi non-linier) dan kapasitor. Melalui *Rudenberg's graphical method*, besar kapasitansi tersebut dapat diperkirakan. Dalam penelitian ini, penghitungan kapasitansi berdasarkan *Rudenberg's graphical method* tidak ditujukan untuk memperoleh nilai kapasitansi secara spesifik, melainkan untuk mengetahui orde atau kisaran kapasitansi. Ilustrasi penghitungan kapasitansi yang melibatkan kurva magnetisasi inti ditunjukkan pada Gambar 3.7 (transformator satu fasa) dan Gambar 3.8 (transformator tiga fasa).

Pada Gambar 3.7 nilai-nilai absolut yang diperoleh pada titik *A*, antara lain:  $\lambda_A = 0.1124$  Wb-T (dikonversikan ke dalam besaran tegangan  $V_L = 35.3$  V),  $\lambda_E = 0.041$  Wb-T (dikonversikan ke dalam besaran tegangan  $E = 12.99$  V),  $V_c = E + V_L = 48.3$  V, dan  $I = 1.1$  A. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam Persamaan 2.1, sehingga besar kapasitansi dapat dihitung sebagai berikut:

$$C = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot V_c} = \frac{1.1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 48.3} = 72.53 \text{ uF}.$$

Dengan mengacu pada nilai kapasitansi yang diperoleh, variasi kapasitansi yang dipilih untuk pengujian feroresonansi pada transformator satu fasa adalah 10 uF, 30 uF, 50 uF, 80 uF, dan 100 uF. Pemilihan variasi kapasitansi yang



melibatkan nilai kurang dan lebih dari penghitungan (72.53 uF) bertujuan untuk mengetahui perbedaan respon feroresonansi dari kedua ambang nilai tersebut.

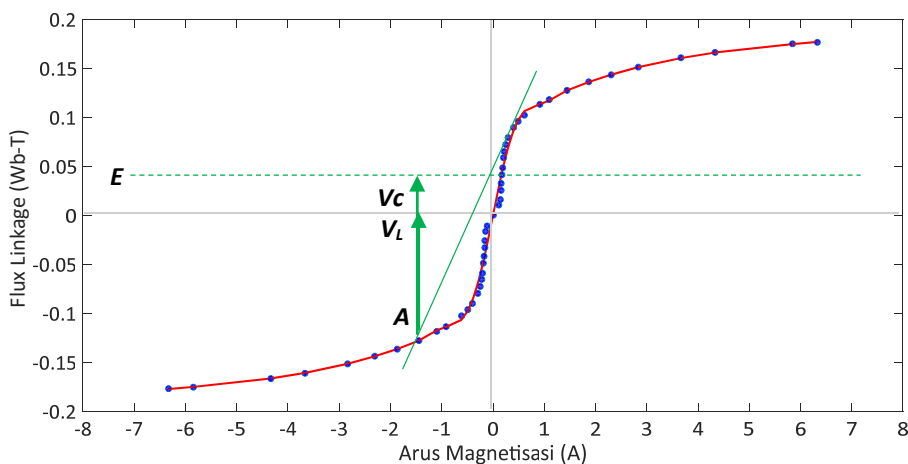
Pendekatan nilai kapasitansi pada transformator tiga fasa hanya dilakukan pada kurva magnetisasi inti fasa R dan T. Hal ini dilakukan karena area saturasi pada kurva magnetisasi inti fasa S belum terlihat. Pada Gambar 3.8 (a) nilai-nilai absolut yang diperoleh pada titik A, antara lain:  $\lambda_A = 0.6$  Wb-T ( $V_L = 189$  V),  $\lambda_E = 0.11$  Wb-T ( $E = 38$  V),  $V_c = 227$  V, dan  $I = 0.4$  A. Kemudian besar kapasitansi

dapat diperoleh sebagai berikut:  $C = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot V_c} = \frac{0.4}{2 \times 3.14 \times 50 \times 227} = 5.62$  uF . Pada

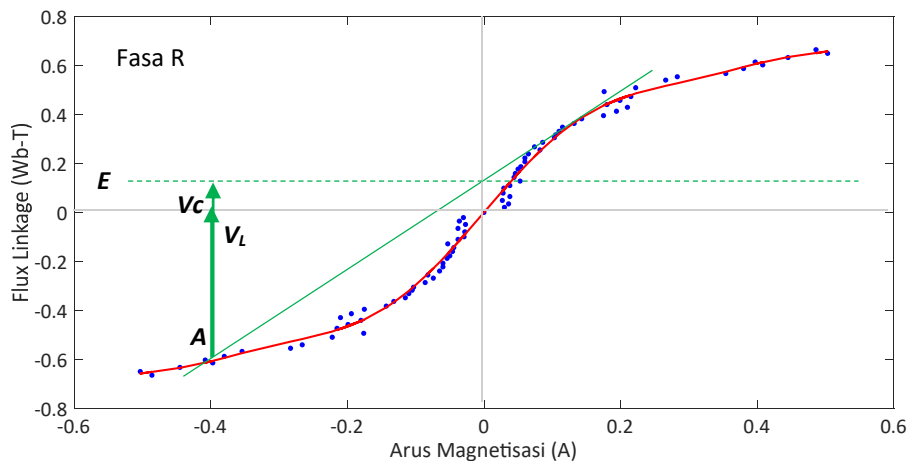
Gambar 3.8 (b) nilai-nilai absolut pada titik A, meliputi:  $\lambda_A = 0.609$  Wb-T ( $V_L = 191.2$  V),  $\lambda_E = 0.178$  Wb-T ( $E = 55.9$  V),  $V_c = 247.1$  V, dan  $I = 0.7$  A. Selanjutnya, besar kapasitansi dapat dihitung sebagai berikut:

$C = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot V_c} = \frac{0.7}{2 \times 3.14 \times 50 \times 247.1} = 9.02$  uF . Dengan mengacu pada hasil

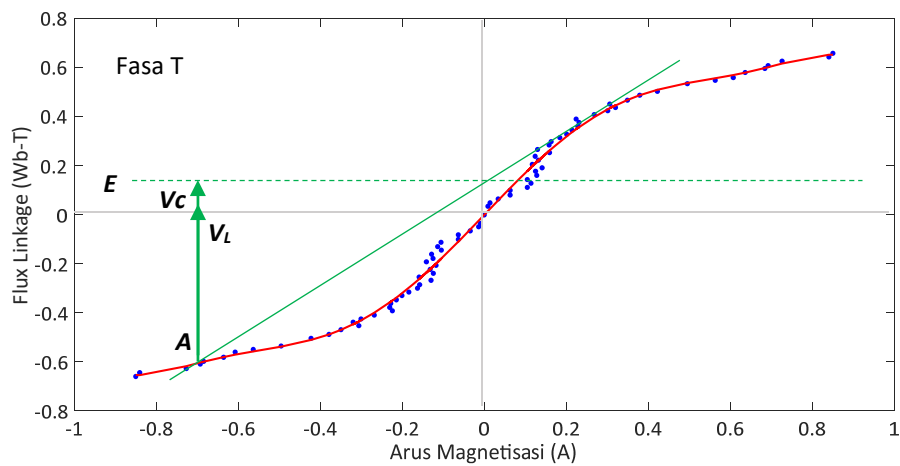
penghitungan kapasitansi fasa R dan T tersebut, variasi kapasitansi yang dipilih untuk pengujian feroresonansi pada transformator tiga fasa adalah 10 uF, 50 uF, dan 100 uF.



Gambar 3.7 Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator Satu Fasa Berdasarkan *Rudenberg's Graphical Method*



(a)



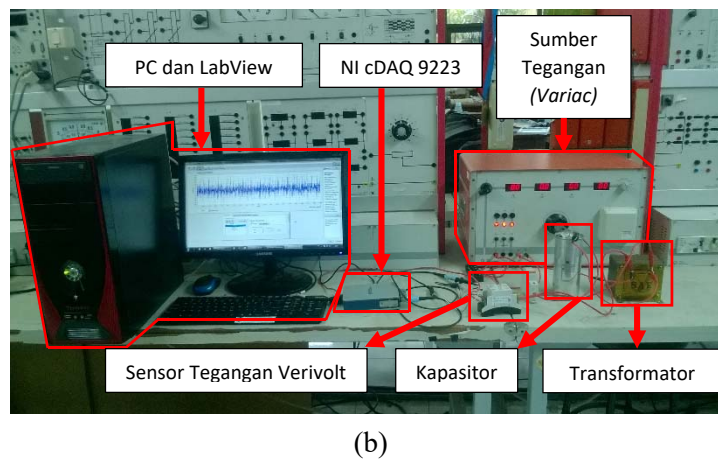
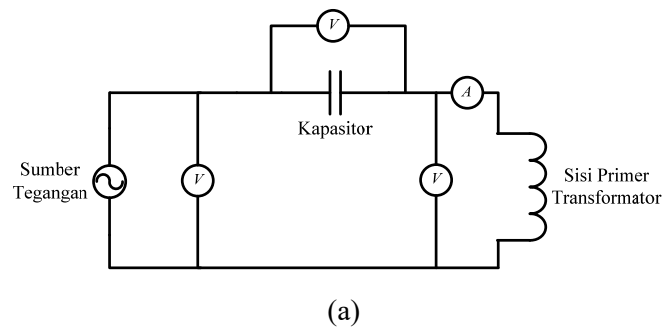
(b)

Gambar 3.8 Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator Tiga Fasa Berdasarkan *Rudenberg's Graphical Method*: a) Fasa R. b) Fasa T.

### 3.3 Pengujian Ferroresonansi

#### 3.3.1 Transformator Satu Fasa

Rangkaian pengujian ferroresonansi pada transformator satu fasa mengacu pada penelitian [22]. Rangkaian tersebut terdiri dari sumber tegangan ( $V_{output} = 0-220 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , dan  $I_{rated} = 6.5 \text{ A}$ ), kapasitor ( $V_{rated} = 450 \text{ V}$ ), dan transformator yang diuji ( $V_{primer} = 30 \text{ V}$ ,  $I_{rated} = 7 \text{ A}$ , dan  $S = 200 \text{ VA}$ ). Ketiga komponen ini disusun secara seri seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9. Transformator yang diuji memiliki inti E1 dan jenis material H18. Sisi sekunder transformator dalam kondisi tidak berbeban.

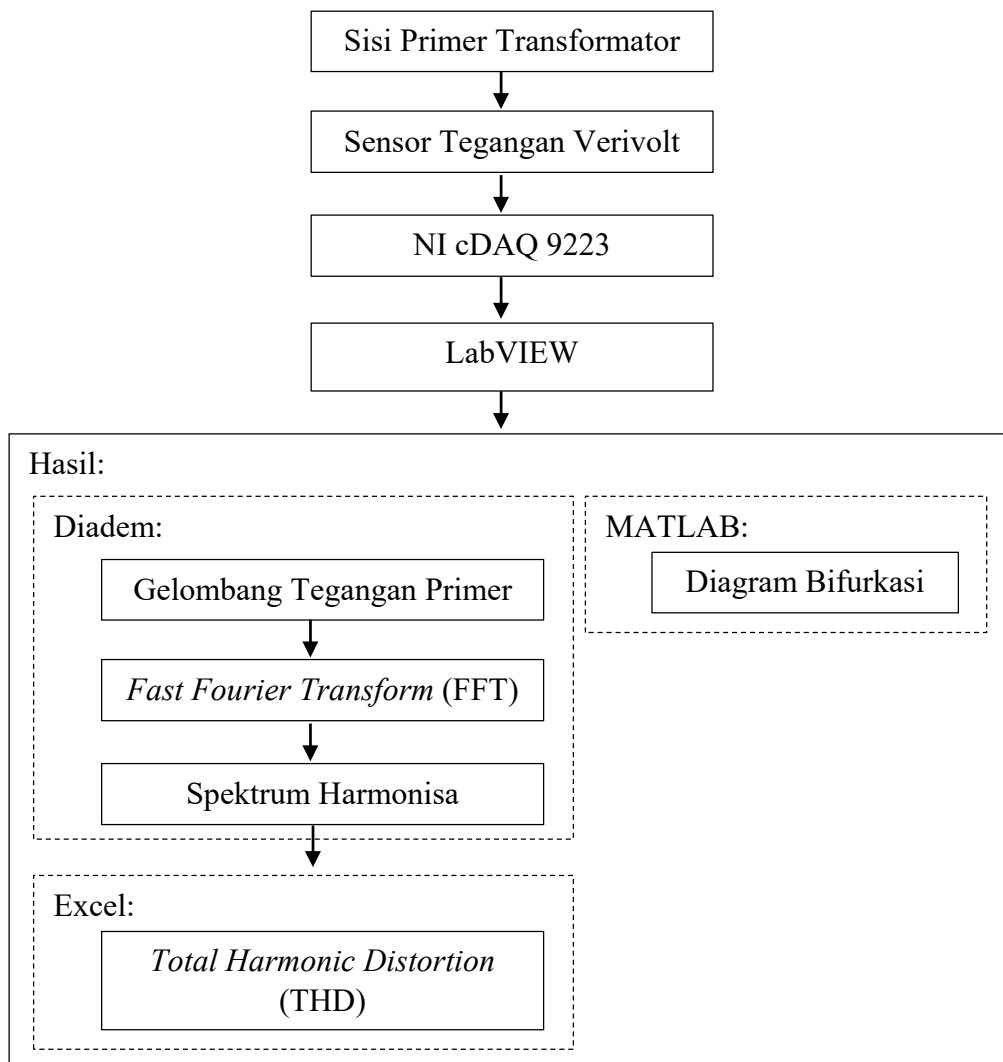


Gambar 3.9 Pengujian Ferroresonansi pada Transformator Satu Fasa: a) Rangkaian. b) Realisasi.

Skema pengujian ferroresonansi yang dilakukan menyerupai penelitian pada [22]. Variasi yang diberikan adalah tegangan sumber (1 - 50 V) dan kapasitansi (10 uF, 30 uF, 50 uF, 80 uF, dan 100 uF). Variasi tegangan sumber dilakukan dengan menaikkan tegangan secara bertahap dan kontinyu dari 1 V hingga 50 V dengan *step* sebesar 1 V. Untuk setiap variasi tegangan sumber, pengukuran meliputi: a) besar tegangan sumber, kapasitor, dan sisi primer transformator, b) besar arus transformator, dan perekaman gelombang tegangan primer transformator dilakukan.

Dalam meminimalkan efek fluks sisa transformator pada pengujian berikutnya (dengan kapasitansi yang berbeda), tegangan sumber diturunkan secara perlahan dari 50 V hingga 0 V. Kemudian sisi primer transformator dihubungkan seri dengan resistor (1 ohm) dan kapasitor (40 uF). Setelah itu, pengujian ferroresonansi dilanjutkan dengan variasi kapasitansi lainnya.

Proses akuisisi dan pengolahan data dilakukan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.10. Perekaman data dilakukan dengan menggunakan perangkat akuisisi data, yaitu sensor tegangan Verivolt, National Instrument - *Compact Data Aquisition* (NI cDAQ) seri 9223, dan program LabView. Dengan menggunakan LabView, sinyal feroresonansi diekspor ke program DIAdem untuk pemotongan dan pengolahan sinyal berbasis *fast fourier transform* (FFT). Kemudian nilai *total harmonic distortion* (THD) dihitung berdasarkan spektrum harmonisa yang diperoleh. Di samping itu, data keluaran Diadem diekspor ke MATLAB untuk penyajian data dalam bentuk diagram bifurkasi.



Gambar 3.10 Alur Akuisisi dan Pengolahan Data pada Transformator Satu Fasa

```

clc;
clear;
hit = 0;
hasilx = [];
hasily = [];
for nn = 1 : 50,
    puncak = [];
    namafile =
[sprintf('%03d',nn),'.mat'];
    load(namafile);
    Vp = Vp(62001:64000);
    puncak = findpeaks(Vp);
    for ii = 1 : size(puncak,1)
        hit = hit + 1;
        hasilx(hit) = nn;
        hasily(hit) =
puncak(ii);
    end
end

```

Gambar 3.11 Kode Program Penyajian Diagram Bifurkasi pada MATLAB

Proses akuisisi data pada LabView melibatkan diagram blok *DAQ Assistance*. Melalui diagram blok tersebut, sensor tegangan Verivolt dan NI cDAQ seri 9223 dapat diintegrasikan dengan LabView. Di samping itu, frekuensi sampling pada NI cDAQ diatur sebesar 100 kHz. Besar frekuensi tersebut mampu merekam secara akurat data gelombang tegangan transformator.

Frekuensi sampling sebesar 100 kHz berarti bahwa terdapat  $10^5$  titik sampel dalam satu detik atau 2000 titik sampel dalam satu periode (frekuensi fundamental = 50 Hz). Kode program penyajian diagram bifurkasi pada MATLAB menyesuaikan dengan jumlah titik sampel dalam satu periode. Dengan menggunakan kode program pada Gambar 3.11, nilai puncak gelombang dan riak dalam satu periode diplot ke sumbu Y sedangkan sumbu X adalah nilai variabel tegangan sumber. Ploting nilai pada sumbu Y tersebut menggunakan fitur *findpeaks* pada MATLAB, sehingga nilai yang diplot adalah nilai yang lebih besar daripada dua nilai yang berada di dekatnya (*two neighboring samples*).

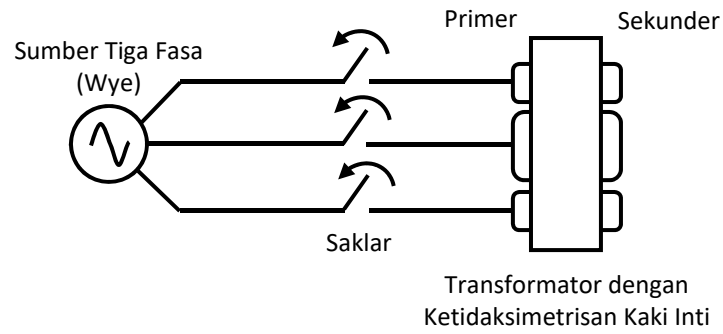
Pengolahan sinyal berbasis FFT pada DIAdem memanfaatkan fitur *signal analysis*, yaitu *fast fourier transform (one time signal)*. Sinyal yang diolah pada FFT sebesar satu periode dengan nilai pada sumbu X adalah waktu (s) dan nilai pada sumbu Y adalah magnitudo tegangan (V). Keluaran FFT pada DIAdem adalah spektrum harmonisa (frekuensi) dengan sumbu X adalah frekuensi (Hz) dan sumbu Y adalah amplitudo tegangan (V). Kemudian THD dihitung berdasarkan spektrum tersebut sesuai Persamaan 2.8. Untuk memudahkan analisis spektrum harmonisa dan THD, frekuensi yang dianalisis yaitu dari 50 Hz hingga 500 Hz dengan *step* sebesar 50 Hz (kelipatan integer 1 – 10 dari frekuensi fundamental).

### 3.3.2 Transformator Tiga Fasa

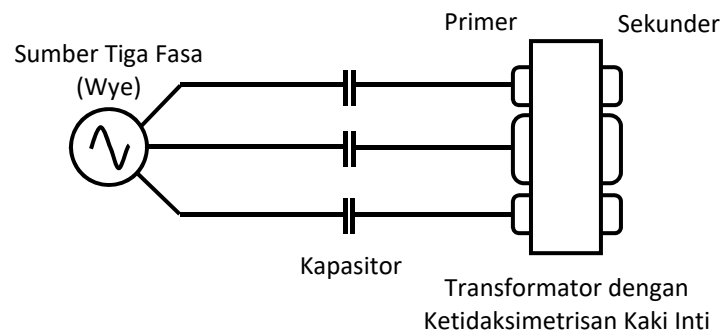
Pengujian feroresonansi pada transformator tiga fasa dilakukan berdasarkan dua skema, meliputi: a) variasi pelepasan fasa (pembukaan pemutus daya atau saklar), b) variasi kapasitansi. Kedua rangkaian pengujian tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.12. Transformator tiga fasa yang diuji memiliki kaki inti fasa S yang lebih besar dibandingkan dengan dua kaki lainnya. Hal ini akan menyebabkan distribusi fluks pada inti tidak seimbang (tidak simetris). Inti transformator berbentuk EI dengan jenis material H. Transformator memiliki daya nominal sebesar 5 kVA dan tegangan nominal primer / sekunder sebesar 220 V / 380 V. Konfigurasi belitan pada sisi primer adalah wye, sedangkan konfigurasi belitan pada sisi sekunder adalah delta. Pengujian feroresonansi dilakukan pada sisi primer dengan kondisi sisi sekunder tidak berbeban.

Pada skema pengujian pertama (ditunjukkan pada Gambar 3.12 (a)) rangkaian pengujian terdiri dari sumber tegangan tiga fasa ( $V_{output} = 0 - 220 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , dan  $I_{rated} = 6.5 \text{ A}$ ), saklar, dan transformator tiga fasa yang diuji. Kapasitor tidak diberikan pada skema pengujian pertama. Hal ini didasarkan bahwa ketidaksimetrisan distribusi fluks pada inti (akibat perbedaan dimensi kaki inti dan pelepasan fasa) akan menimbulkan kapasitansi pada setiap fasa. Variasi operasi saklar diberikan untuk menginisiasi feroresonansi, meliputi: a) fasa S dibuka, b) fasa T dibuka, c) fasa R dan S dibuka, d) fasa R dan T dibuka. Untuk setiap

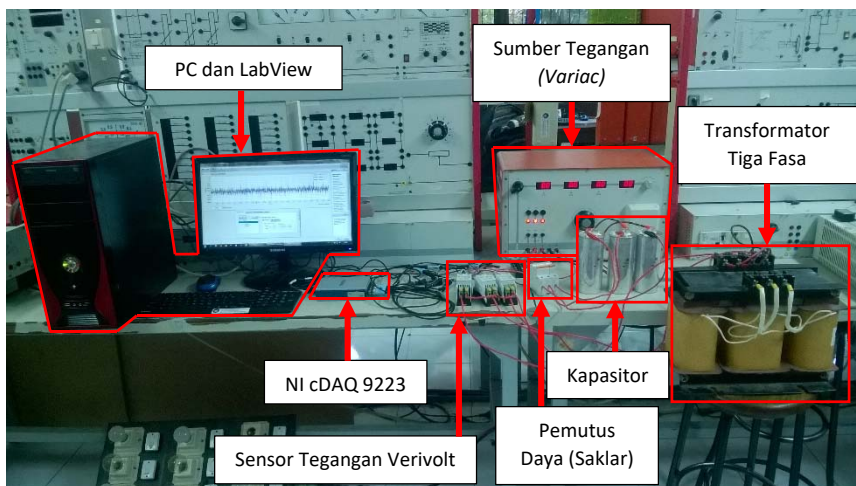
variasi tersebut, besar tegangan dan arus fasa pada sumber (*variac*) dan sisi primer transformator diukur dan gelombang tegangan primer transformator direkam.



(a)

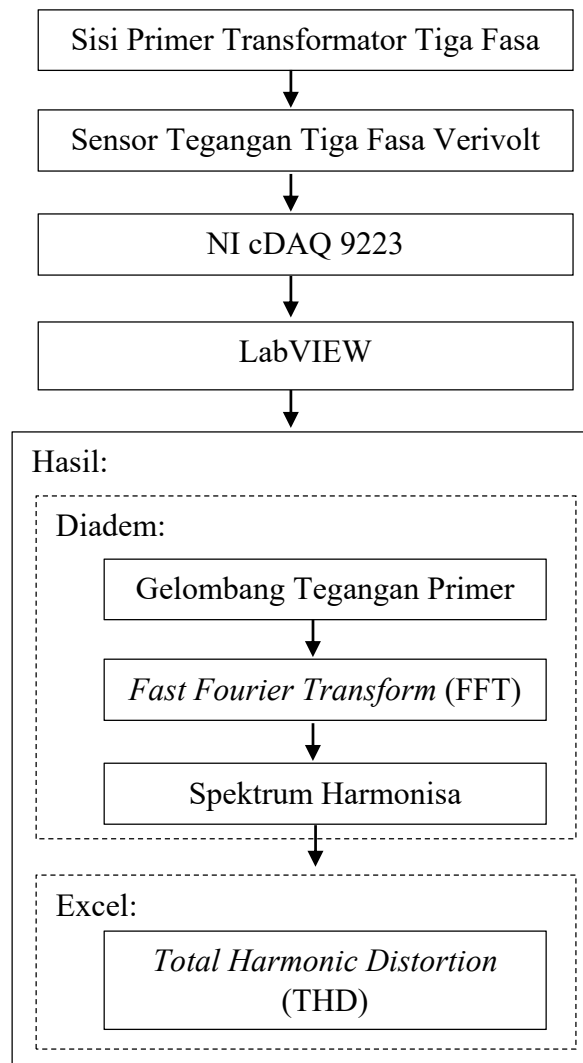


(b)



(c)

Gambar 3.12 Pengujian Feroresonansi pada Transformator Tiga Fasa: a) Rangkaian Variasi Pelepasan Fasa. b) Rangkaian Variasi Kapasitansi. c) Realisasi.



Gambar 3.13 Alur Akuisisi dan Pengolahan Data pada Transformator Tiga Fasa

Skema pengujian kedua ditunjukkan pada Gambar 3.12 (b). Rangkaian pengujiannya terdiri dari sumber tegangan tiga fasa ( $V_{output} = 0 - 220 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , dan  $I_{rated} = 6.5 \text{ A}$ ), kapasitor ( $V_{rated} = 450 \text{ V}$ ), dan transformator tiga fasa yang diuji. Faktor inisiasi feroresonansi yang diberikan berupa variasi kapasitansi, yaitu sebesar  $10 \text{ uF}$ ,  $50 \text{ uF}$ , dan  $100 \text{ uF}$ . Untuk setiap variasi tersebut, pengukuran meliputi: a) besar tegangan sumber, kapasitor, dan sisi primer transformator, b) besar arus transformator, dan perekaman gelombang tegangan primer transformator dilakukan. Dalam meminimalkan efek fluks sisa transformator (seperti pada pengujian transformator satu fasa), tegangan sumber diturunkan



secara perlahan hingga bernilai 0 V. Kemudian sisi primer transformator dihubungkan seri dengan resistor (10 ohm) dan kapasitor (40 uF). Setelah itu, pengujian feroresonansi dilanjutkan dengan variasi kapasitansi lainnya.

Secara umum, proses akuisisi dan pengolahan data pada transformator tiga fasa menyerupai pada transformator satu fasa seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13. Namun, penyajian diagram bifurkasi tidak dilakukan pada transformator tiga fasa karena variasi tegangan tidak diberikan. Perekaman data dilakukan dengan menggunakan perangkat akuisisi data, yaitu sensor tegangan tiga fasa Verivolt, NI cDAQ seri 9223, dan program LabView. Melalui LabView, sinyal feroresonansi pada setiap fasa akan diekspor ke program DIAdem untuk pemotongan dan pengolahan sinyal berbasis FFT. Kemudian nilai THD dihitung berdasarkan spektrum harmonisa yang diperoleh. Adapun pengaturan akuisisi data melalui *DAQ Assistance* pada LabView dan pengolahan sinyal berbasis FFT pada DIAdem diperlakukan sama dengan pengujian transformator satu fasa.

### 3.4 Simulasi Feroresonansi

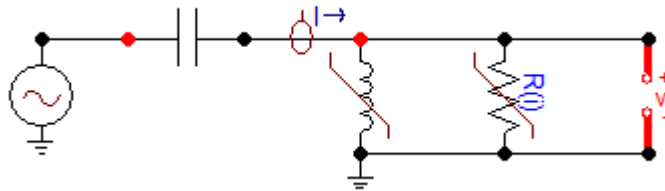
#### 3.4.1 Transformator Satu Fasa

Simulasi feroresonansi dilakukan pada program ATPDraw. Model rangkaian feroresonansi pada transformator satu fasa mengacu pada penelitian [17,21] seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14. Sisi primer transformator dimodelkan sebagai induktansi non-linier, yang merepresentasikan efek saturasi, sedangkan rugi-rugi dimodelkan sebagai resistansi non-linier. Parameter yang dimasukkan pada komponen induktansi non-linier adalah kurva magnetisasi inti transformator (ditunjukkan pada Gambar 3.3) dengan sumbu X adalah arus magnetisasi dan sumbu Y adalah *flux linkage* ( $\lambda$ ), sedangkan parameter pada komponen resistansi non-linier adalah arus resistif pada sumbu X dan tegangan pada sumbu Y seperti ditunjukkan pada Gambar 3.15. Besar arus resistif tersebut diperoleh berdasarkan Persamaan 3.3.

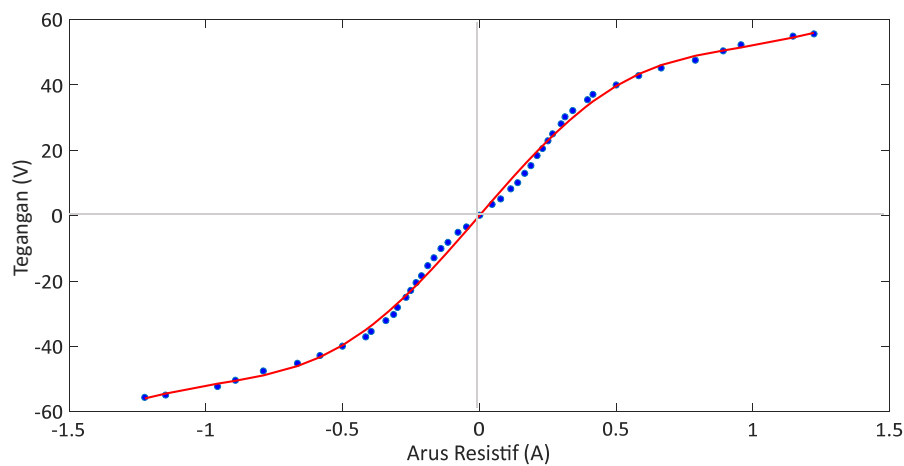
Besar frekuensi sampling, spesifikasi komponen-komponen, seperti transformator dan kapasitor, dan skema pada simulasi sama dengan pengujian. Namun, sumber tegangan pada pengujian yang berupa *variac* (transformator) dimodelkan sebagai sumber sinusoidal murni pada simulasi. Hal ini mungkin

dapat menyebabkan sedikit perbedaan hasil antara simulasi dengan pengujian. Akan tetapi, perbedaan tersebut dapat diabaikan karena penelitian ini lebih menitikberatkan pada inisiasi feroresonansi secara fisik.

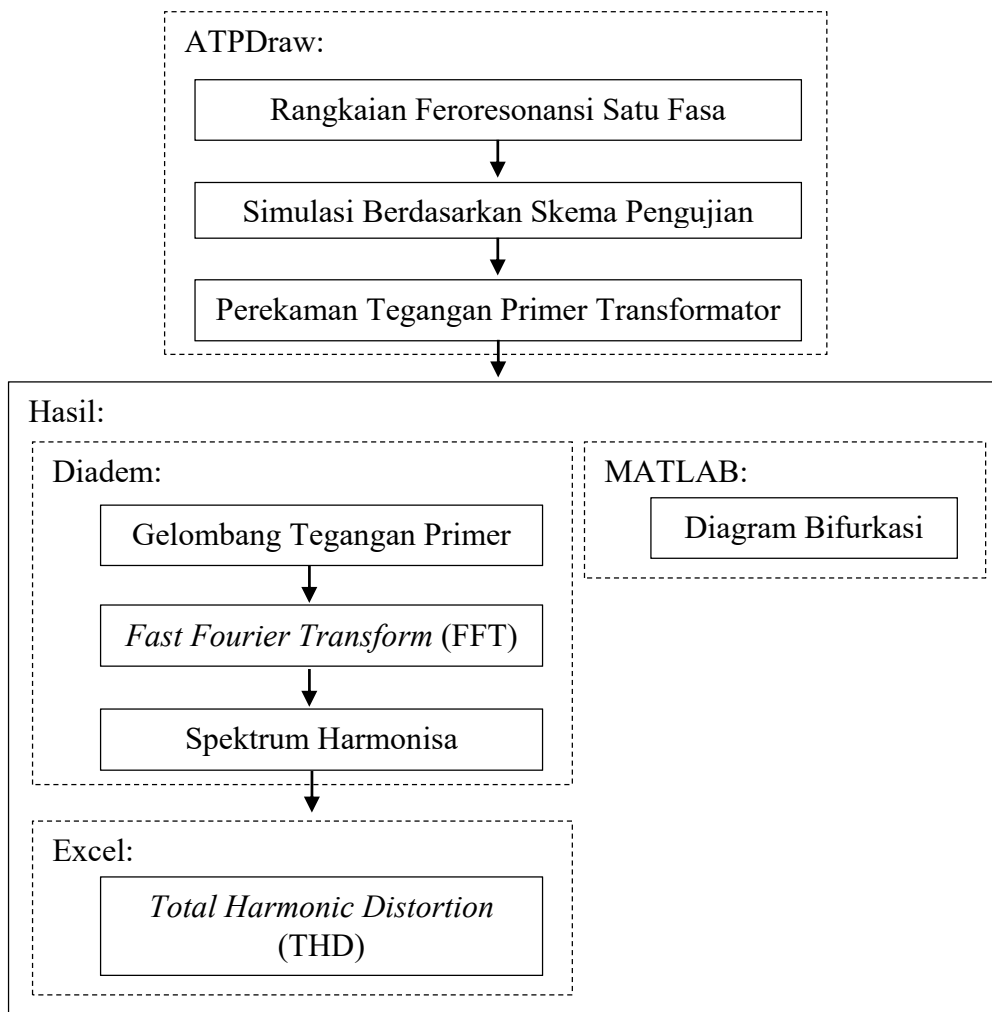
Respon tegangan primer pada transformator disimpan untuk setiap variasi tegangan dan kapasitansi yang diberikan. Kemudian magnitudo gelombang tegangan primer diekspor ke MATLAB (.mat) untuk mendapatkan diagram bifurkasi. Penyajian diagram bifurkasi tersebut dilakukan sama seperti pengujian. Di samping itu, melalui ATPDraw, gelombang tegangan primer akan diekspor ke program DIAdem untuk pemotongan dan pengolahan sinyal berbasis FFT.



Gambar 3.14 Rangkaian Simulasi Feroresonansi pada Transformator Satu Fasa



Gambar 3.15 Kurva Arus Resistif terhadap Tegangan pada Transformator Satu Fasa sebagai Komponen Resistansi Non-linier pada ATPDraw. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan.



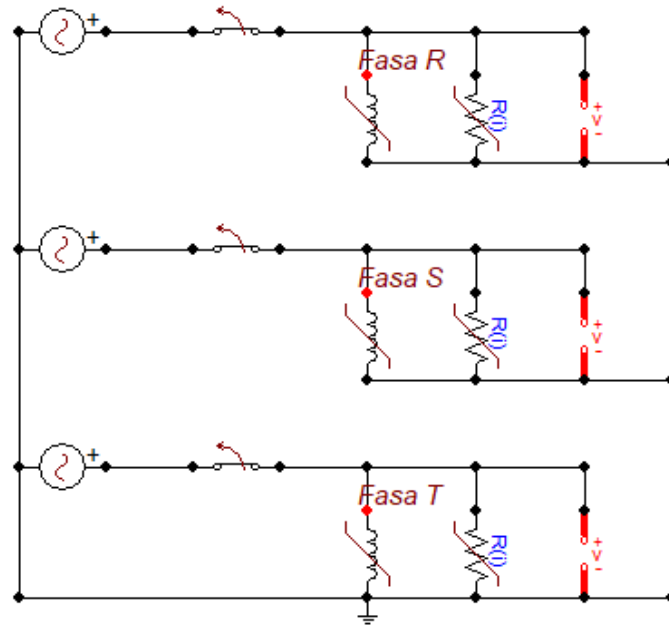
Gambar 3.16 Alur Pengolahan Data Simulasi pada Transformator Satu Fasa

Pengaturan pengolahan sinyal tersebut juga diperlakukan sama seperti pengujian. Kemudian nilai THD dihitung berdasarkan spektrum harmonisa yang diperoleh. Adapun penjelasan tentang proses pengolahan data simulasi ini diilustrasikan pada Gambar 3.16.

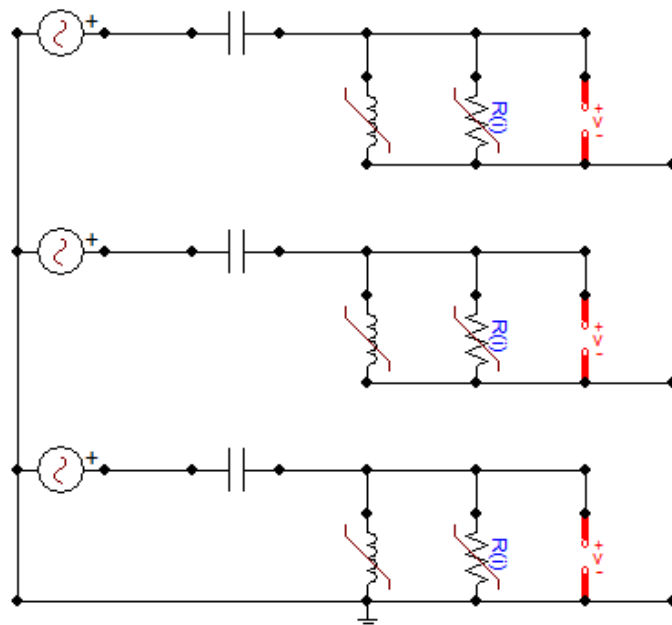
### 3.4.2 Transformator Tiga Fasa

Rangkaian feroresonansi transformator tiga fasa dengan ketidaksimetrisan kaki inti (distribusi fluks tidak simetris) pada ATPDraw mengacu pada penelitian [12,13]. Model rangkaian transformator tiga fasa tersebut terdiri dari tiga rangkaian transformator satu fasa yang diparalel, seperti ditunjukkan pada

Gambar 3.17. Induktansi non-linier adalah sisi primer transformator, sedangkan resistansi non-linier adalah rugi-rugi.



(a)



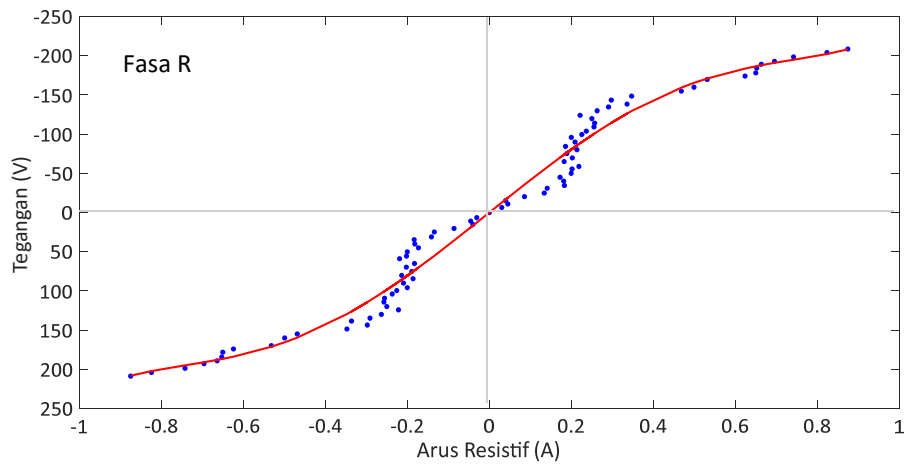
(b)

Gambar 3.17 Rangkaian Simulasi Feroresonansi pada Transformator Tiga Fasa: a) Variasi Pelepasan Fasa. b) Variasi Kapasitansi.

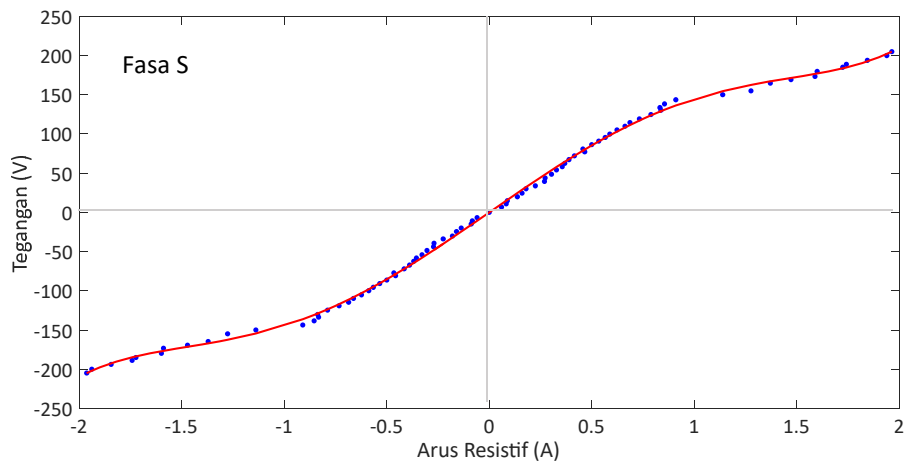
Pengisian nilai komponen induktansi non-linier dan resistansi non-linier pada transformator tiga fasa sama dengan transformator satu fasa dan mengacu pada hasil pengukuran. Dalam hal ini, kurva magnetisasi inti transformator tiga fasa (ditunjukkan pada Gambar 3.5) dimasukkan ke dalam komponen induktansi non-linier, sedangkan parameter pada komponen resistansi non-linier adalah arus resistif pada sumbu X dan tegangan pada sumbu Y seperti ditunjukkan pada Gambar 3.18. Namun, karena program ATPDraw akan *error* apabila kecenderungan nilai pada sumbu Y tidak berbanding lurus terhadap nilai pada sumbu X, nilai yang dimasukkan adalah hanya sebagian nilai yang memiliki hubungan berbanding lurus antara nilai pada sumbu X dan Y. Hal ini juga didasarkan bahwa jumlah data yang dapat dimasukkan ke dalam komponen non-linier pada ATPDraw dibatasi. Perlakuan ini mungkin menyebabkan perbedaan hasil antara simulasi dan pengujian. Namun, penelitian ini lebih menitikberatkan pada inisiasi feroresonansi secara fisik, sehingga perbedaan hasil dapat ditolerir.

Spesifikasi komponen, skema, dan besar frekuensi sampling pada simulasi sama dengan pengujian. Akan tetapi, sumber tegangan tiga fasa pada simulasi dimodelkan sebagai sumber tegangan tiga fasa sinusoidal murni, sedangkan sumber tegangan pada pengujian adalah *variatic* (transformator tiga fasa). Pada skema pertama (ditunjukkan pada Gambar 3.17 (a)) saklar diberikan pada setiap fasa untuk mensimulasikan kondisi pelepasan fasa akibat pembukaan saklar. Pada skema kedua (ditunjukkan pada Gambar 3.17 (b)) kapasitor diseri dengan sisi primer transformator. Nilai kapasitor tersebut divariasikan sesuai dengan skema pengujian.

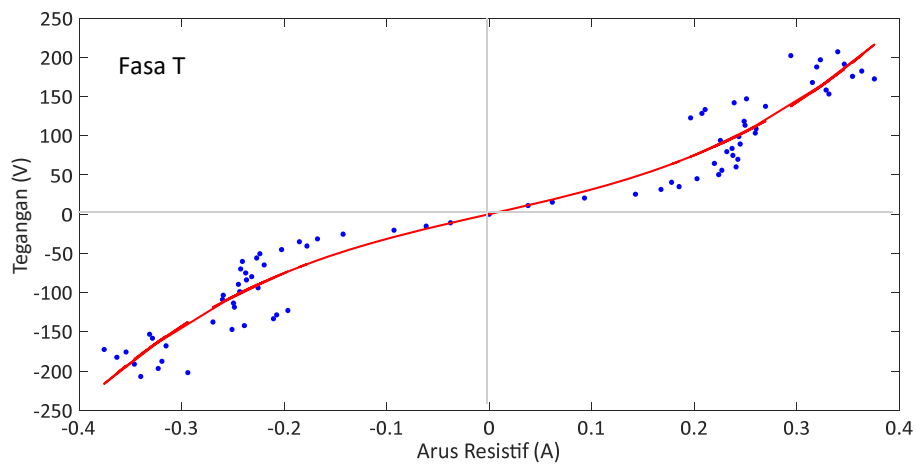
Proses pengolahan data simulasi dilakukan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.19. Secara umum, proses tersebut sama dengan simulasi pada transformator satu fasa. Namun, penyajian diagram bifurkasi pada MATLAB tidak dilakukan. Dalam setiap skema yang diberikan, respon tegangan primer pada setiap fasa disimpan. Kemudian gelombang tegangan primer diekspor ke program DIAdem untuk pemotongan dan pengolahan sinyal berbasis FFT. Pengaturan pengolahan sinyal pada DIAdem tersebut diperlakukan sama seperti pengujian. Selanjutnya, spektrum harmonisa yang diperoleh digunakan untuk mendapatkan nilai THD berdasarkan Persamaan 3.3.



(a)

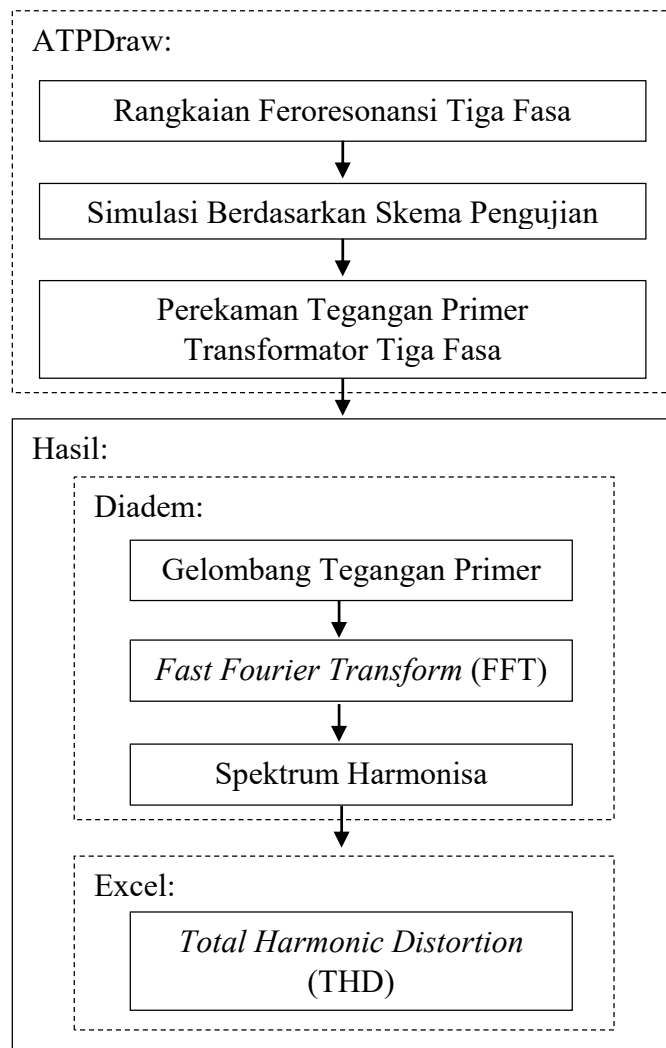


(b)



(c)

Gambar 3.18 Kurva Arus Resistif pada Transformator Tiga Fasa sebagai Komponen Resistansi Non-linier pada ATPDraw: a) Fasa R. b) Fasa S. c) Fasa T. Biru: Pengukuran. Merah: Pendekatan



Gambar 3.19 Alur Pengolahan Data Simulasi pada Transformator Tiga Fasa

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil inisiasi dan analisis karakteristik feroresonansi pada transformator satu fasa dan tiga fasa dibahas pada bab ini. Pembahasan pada transformator satu fasa mencakup beberapa hal, meliputi:

- a) Kecenderungan besar arus dan tegangan pada sumber, kapasitor, dan transformator.
- b) Kecenderungan bentuk gelombang tegangan transformator.
- c) Diagram bifurkasi yang meringkas efek tegangan sumber terhadap respon tegangan transformator.
- d) Spektrum harmonisa yang memuat frekuensi harmonisa.
- e) *Total Harmonic Distortion* (THD) yang menunjukkan tingkat harmonisa (distorsi) pada gelombang tegangan transformator.
- f) Pengkategorian respon sistem.

Pembahasan pada transformator tiga fasa dibagi menjadi dua berdasarkan faktor inisiasi yang diberikan, yaitu variasi pelepasan fasa dan kapasitansi. Dalam setiap skema tersebut, karakteristik feroresonansi pada tegangan primer transformator dijelaskan dari beberapa aspek, antara lain:

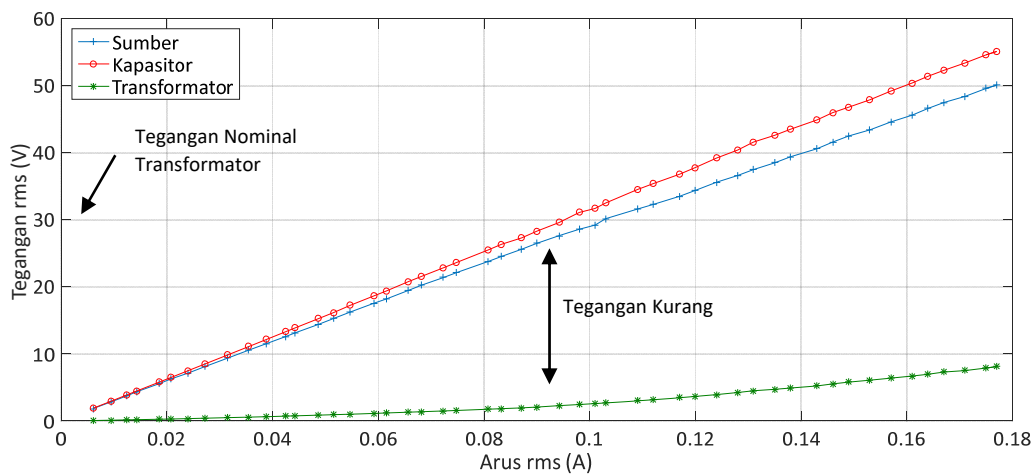
- a) Besar arus dan tegangan pada sumber, kapasitor, dan transformator.
- b) Bentuk gelombang tegangan primer.
- c) Spektrum harmonisa.
- d) THD.
- e) Pengkategorian respon sistem.

#### **4.1 Inisiasi dan Karakteristik Feroresonansi pada Transformator Satu Fasa**

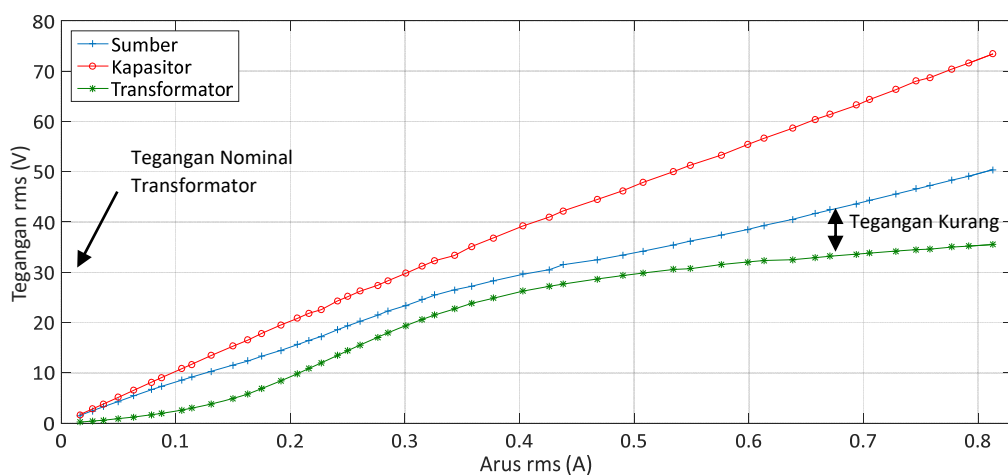
##### **4.1.1 Kecenderungan Besar Arus dan Tegangan pada Sumber, Kapasitor, dan Transformator**

Hasil pengukuran arus dan tegangan (*root mean square* atau rms) pada sisi primer transformator dan kapasitor untuk seluruh variasi tegangan sumber dan

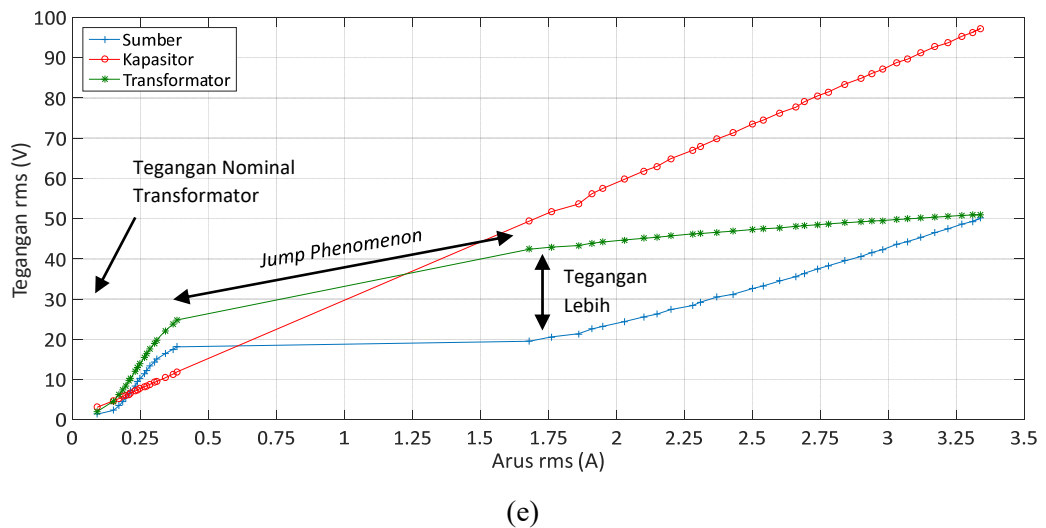
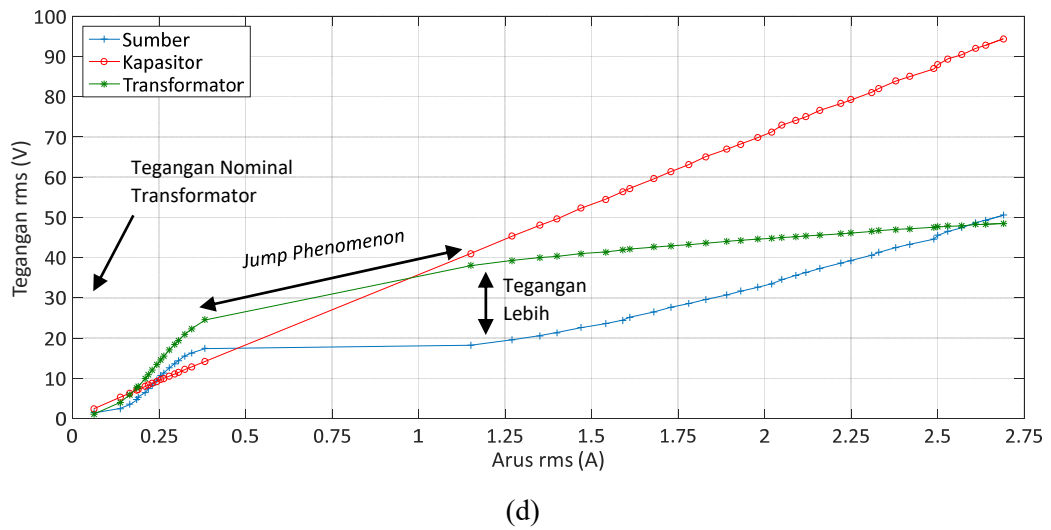
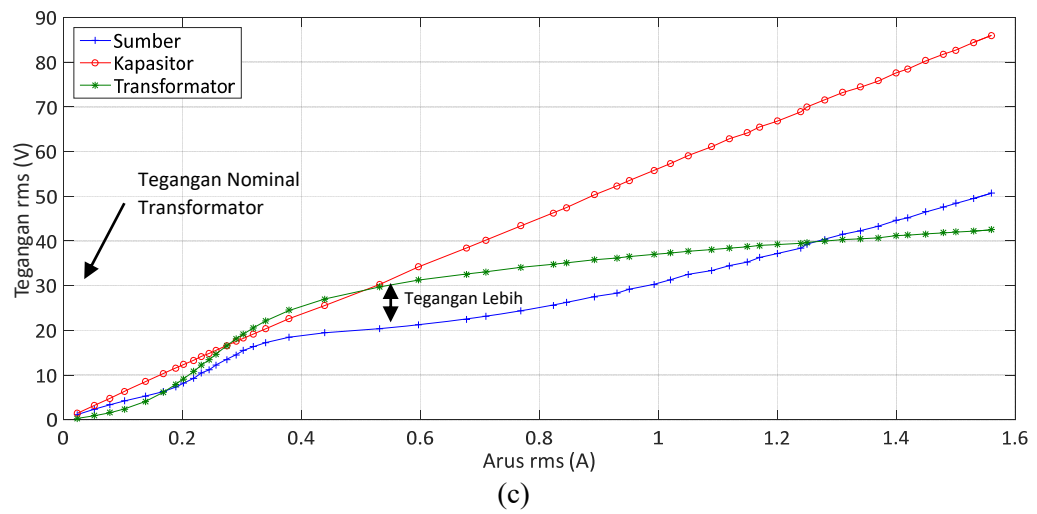
kapasitansi ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada hasil pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  (Gambar 4.1 (a)) arus dan tegangan pada transformator dan kapasitor berbanding lurus terhadap tegangan sumber. Akan tetapi, besar tegangan transformator lebih kecil dibandingkan dengan tegangan sumber dan kapasitor, sedangkan besar tegangan kapasitor justru lebih besar dibandingkan dengan tegangan sumber. Selain itu, selisih tegangan transformator dan sumber cukup signifikan. Ketika tegangan sumber bernilai 50.1 V, tegangan transformator hanya sebesar 8.11 V sedangkan tegangan kapasitor sebesar 55.1 V dan arus terukur sebesar 0.177 A.



(a)



(b)



Gambar 4.1 Kecenderungan Arus dan Tegangan pada Kapasitor dan Transformator terhadap Tegangan Sumber untuk Variasi Kapasitansi: a) 10  $\mu\text{F}$ . b) 30  $\mu\text{F}$ . c) 50  $\mu\text{F}$ . d) 80  $\mu\text{F}$ . e) 100  $\mu\text{F}$ .

Pada hasil pengujian dengan kapasitansi sebesar 30  $\mu\text{F}$  (Gambar 4.1 (b)) tegangan transformator masih bernilai lebih kecil dibandingkan dengan tegangan kapasitor dan sumber. Tegangan kapasitor juga masih lebih besar daripada tegangan sumber. Namun, pada variasi kapasitansi ini selisih tegangan transformator dan sumber lebih kecil, terutama ketika tegangan transformator berkisar pada 20 V – 30 V. Kemudian selisih kedua tegangan tersebut bertambah seiring dengan peningkatan tegangan transformator di atas 30 V. Hal ini menunjukkan bahwa pada area saturasi tingkat kenaikan tegangan transformator menjadi relatif rendah. Di samping itu, pada tegangan sumber yang sama arus yang terukur lebih besar dibandingkan dengan pengujian sebelumnya.

Kondisi berbeda ditemui pada hasil pengujian feroresonansi dengan kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1 (c). Tegangan transformator melebihi tegangan sumber (didefinisikan sebagai kondisi tegangan lebih) sejak pemberian tegangan sumber sebesar 7.31 V (tegangan transformator terukur sebesar 7.91 V) hingga mencapai 39.3 V (tegangan transformator = 39.7 V). Tingkat tegangan lebih yang paling besar terlihat pada tegangan sumber sebesar 21.25 V (tegangan transformator = 31.25 V), yaitu senilai 47 %.

Kemudian tegangan sumber cenderung lebih besar daripada tegangan transformator seiring dengan pemberian tegangan sumber di atas 39.3 V (tegangan transformator = 39.7). Hal ini dapat dijelaskan oleh adanya kondisi saturasi yang menyebabkan tingkat kenaikan tegangan transformator menjadi relatif rendah seperti ditemui pada pengujian sebelumnya. Di samping itu, hasil pengukuran arus menunjukkan bahwa besar arus pada variasi kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  lebih besar daripada pengujian dengan kapasitansi sebesar 10  $\mu\text{F}$  dan 30  $\mu\text{F}$ . Besar tegangan kapasitor yang melebihi tegangan sumber juga semakin terlihat pada pengujian ini.

Kondisi tegangan lebih dan perubahan respon secara mendadak (*jump phenomenon*) ditemui pada variasi kapasitansi sebesar 80  $\mu\text{F}$  dan 100  $\mu\text{F}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1 (d) dan (e). Kedua variasi kapasitansi tersebut lebih besar daripada nilai kapasitansi berdasarkan *Rudenberg's graphical method*, yaitu sebesar 72.54  $\mu\text{F}$ . Pemberian kapasitansi yang semakin besar menyebabkan kemiringan kurva  $V_c$  pada grafik *Rudenberg* (ditunjukkan pada Gambar 2.3)

semakin landai dan memotong kurva magnetisasi inti transformator di area saturasi. Adanya perpotongan di area saturasi tersebut menyebabkan efek (karakteristik) feroresonansi semakin terlihat.

Kondisi tegangan lebih ditemui sejak pemberian tegangan sumber sebesar 4.63 V (tegangan transformator = 7.59 V) untuk kapasitansi 80 uF dan 1.37 V (tegangan transformator = 2.04 V) untuk kapasitansi 100 uF. *Jump phenomenon* ditandai oleh lonjakan arus dan tegangan pada transformator dan kapasitor secara signifikan akibat sedikit kenaikan tegangan sumber sekitar 1 V. Fenomena tersebut terjadi pada besar tegangan sumber yang hampir sama, yaitu 18.23 V untuk kapasitansi sebesar 80 uF dan 19.53 V untuk kapasitansi sebesar 100 uF. Namun, besar lonjakan arus dan tegangan terlihat lebih signifikan pada pengujian dengan kapasitansi 100 uF.

Pada hasil pengujian dengan kapasitansi 100 uF (Gambar 4.1 (d)) peningkatan tegangan sumber dari 18.13 V menjadi 19.53 V menyebabkan perubahan tegangan transformator dari 24.81 V menjadi 42.4 V ( $\Delta V = 70.9\%$ ) dan tegangan kapasitor dari 11.94 V menjadi 49.4 V ( $\Delta V = 313.74\%$ ) dengan arus terukur dari 0.384 A menjadi 1.68 A ( $\Delta I = 337.5\%$ ). Pada hasil pengujian dengan kapasitansi 80 uF (Gambar 4.1 (e)) peningkatan tegangan sumber dari 17.38 V menjadi 18.23 V menyebabkan perubahan tegangan transformator dari 24.48 V menjadi 38 V ( $\Delta V = 55.2\%$ ) dan tegangan kapasitor dari 14.18 V menjadi 41 V ( $\Delta V = 189.14\%$ ) dengan arus terukur dari 0.383 A menjadi 1.15 A ( $\Delta I = 200.61\%$ ). Di samping itu, tingkat tegangan lebih terbesar berada pada tegangan transformator sebesar 42.4 V (tegangan sumber = 19.53 V) untuk kapasitansi 100 uF, yaitu sebesar 117.1 %, dan 38 V (tegangan sumber = 18.23 V) untuk kapasitansi 80 uF, yaitu sebesar 108.5 %.

Efek kondisi saturasi yang menyebabkan tingkat kenaikan tegangan transformator menjadi relatif rendah juga diamati pada hasil pengujian dengan kapasitansi 80 uF dan 100 uF. Hal ini terlihat dari kurva tegangan transformator yang cenderung landai sejak pemberian tegangan sumber di atas 18.23 V (tegangan transformator = 38 V) untuk kapasitansi 80 uF dan 19.53 V (tegangan transformator = 42.4 V) untuk kapasitansi 100 uF. Akibatnya, besar tegangan sumber kian mendekati tegangan transformator. Bahkan, tegangan sumber bernilai

lebih besar daripada tegangan transformator ketika pemberian tegangan sumber mencapai 48.7 V (tegangan transformator = 48.2 V) untuk kapasitansi 80 uF.

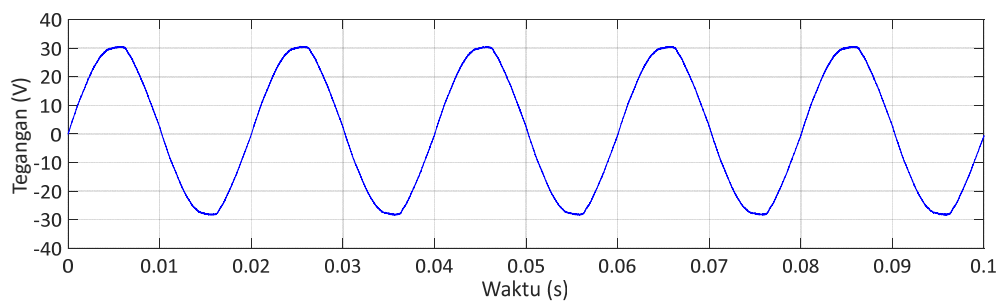
Besar arus pada pengujian dengan kapasitansi 100 uF yang cenderung lebih besar daripada kapasitansi 80 uF semakin membuktikan adanya hubungan berbanding lurus antara arus dan nilai kapasitansi. Adanya arus yang tinggi tersebut (meskipun kurang dari arus nominal transformator) dan disertai tegangan lebih menyebabkan inti transformator terasa panas dan timbul bunyi dengung (*loud noise*). Kemudian belitan transformator turut panas akibat kenaikan temperatur inti tersebut.

#### **4.1.2 Kecenderungan Bentuk Gelombang Tegangan Transformator**

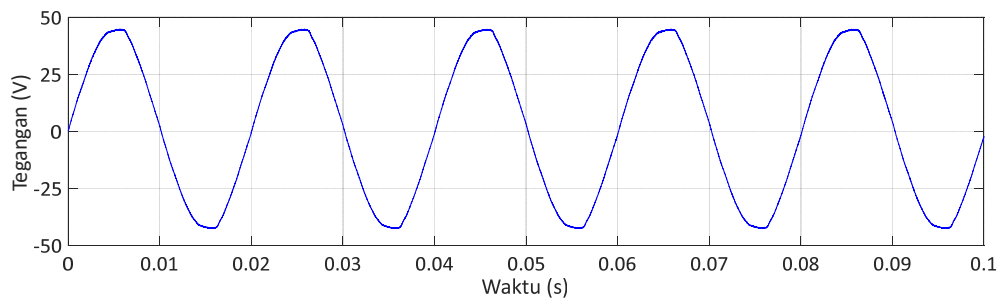
Hasil perekaman gelombang tegangan primer transformator berdasarkan hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.2 untuk kondisi normal (tanpa kapasitor) dan Gambar 4.3 – 4.7 untuk kondisi feroresonansi (dengan kapasitor). Bentuk gelombang kondisi normal terlihat sinusoidal meskipun puncak gelombang sedikit tidak sempurna. Hasil ini dapat disebabkan oleh *noise* yang berasal dari perangkat akuisisi data dan harmonisa sumber. Namun, bentuk gelombang tersebut dapat dibedakan secara jelas dengan bentuk gelombang feroresonansi. Di samping itu, periode gelombang bernilai sama yaitu 20 ms.

Distorsi bentuk gelombang semakin terlihat jelas seiring dengan peningkatan tegangan sumber untuk kapasitansi selain 10 uF. Distorsi tersebut diamati sebagai puncak gelombang yang seolah-olah terbelah menjadi dua seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4 – 4.7. Di sisi lain, tingkat distorsi bentuk gelombang cenderung berkurang seiring dengan peningkatan tegangan sumber untuk kapasitansi 10 uF. Hal ini diamati pada puncak gelombang yang semula terbelah tiga menjadi terbelah dua seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 (a) - (b). Bentuk puncak gelombang terbelah dua tersebut menyerupai bentuk gelombang terdistorsi pada variasi kapasitansi lainnya. Ketidaksimetrisan amplitudo gelombang juga hanya ditemukan pada kapasitansi 10 uF. Di samping itu, *jump phenomenon* pada kapasitansi 80 uF dan 100 uF dapat diamati dari perubahan bentuk gelombang yang semula menyerupai sinusoidal menjadi terdistorsi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6 (a) – (b) dan 4.7 (a) – (b).

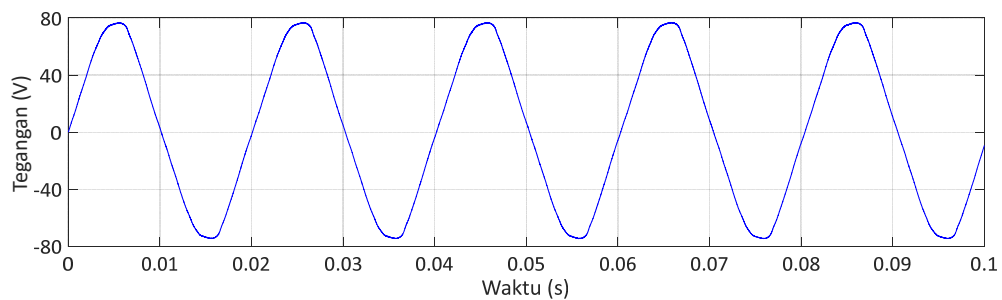
Karakteristik bentuk gelombang pada hasil simulasi (ditunjukkan pada Gambar 4.8 – 4.12) menyerupai hasil pengujian. Namun, hubungan berbanding lurus antara tegangan sumber dan distorsi turut dijumpai pada kapasitansi 10 uF dengan bentuk gelombangnya berbeda ketimbang variasi kapasitansi lainnya. Selain itu, *jump phenomenon* terlihat pada tegangan sumber yang lebih kecil. Adanya perbedaan bentuk dan amplitudo gelombang disebabkan terutama oleh komponen induktansi dan resistansi pada sumber tegangan (*variac*) yang diabaikan pada simulasi.



(a)

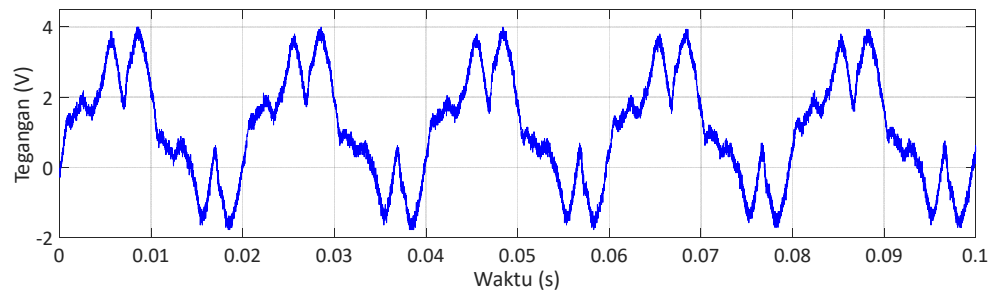


(b)

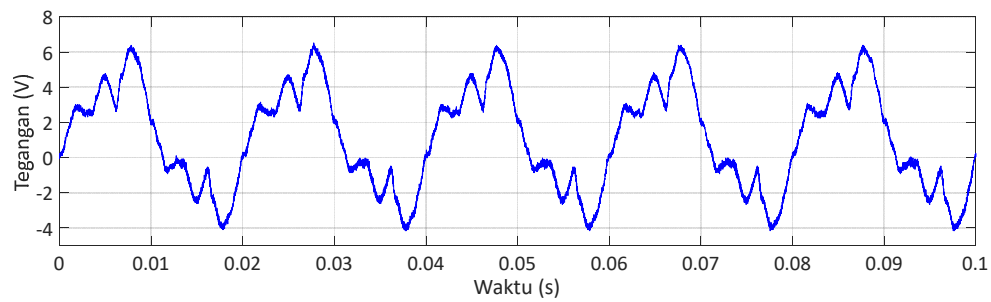


(c)

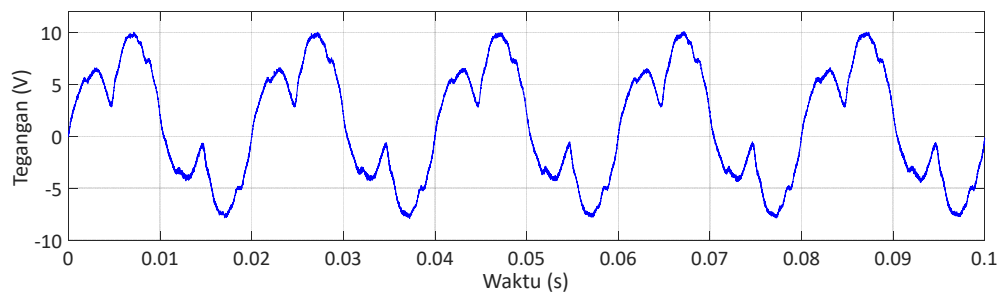
Gambar 4.2 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian Tanpa Kapasitansi dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 50 V.



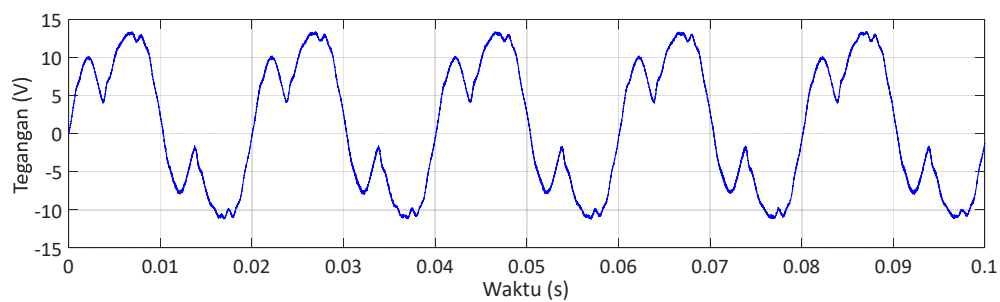
(a)



(b)



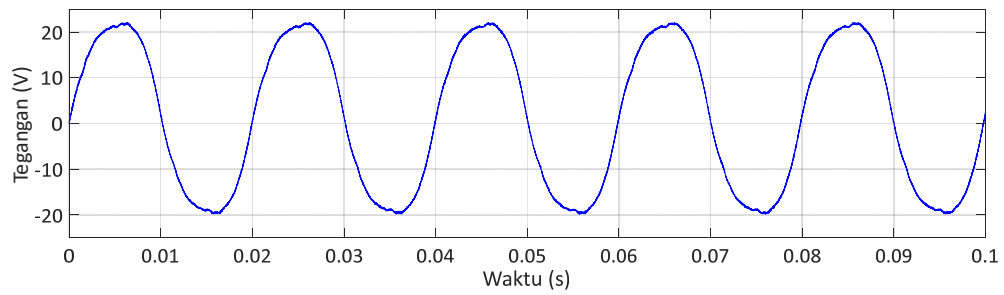
(c)



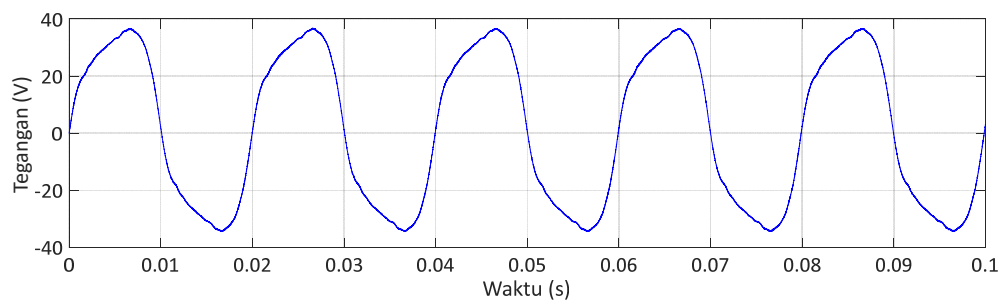
(d)

Gambar 4.3 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.

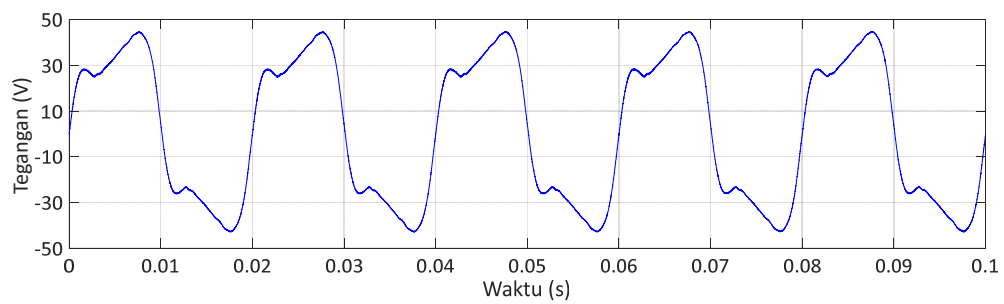




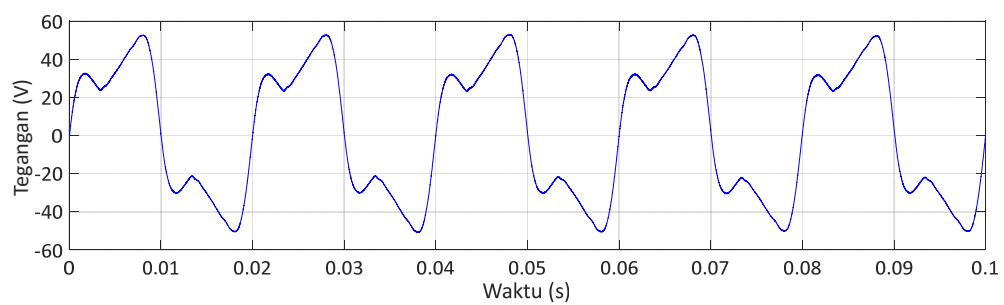
(a)



(b)

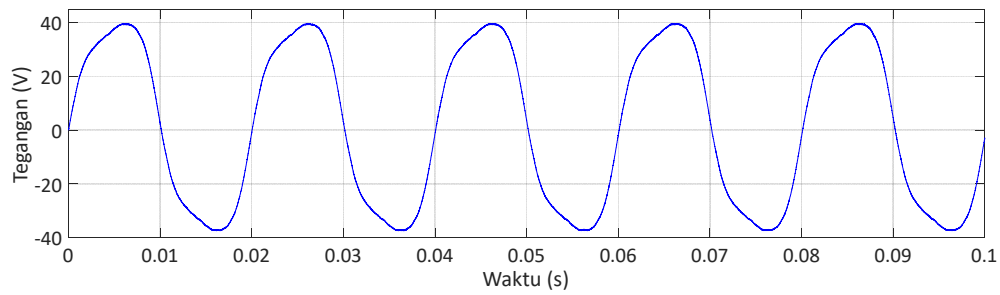


(c)

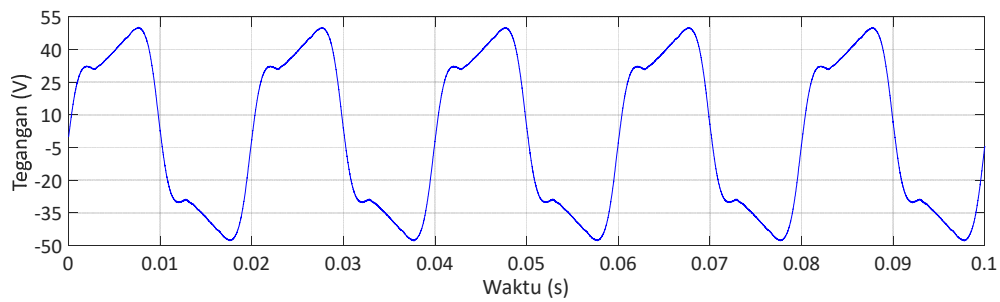


(d)

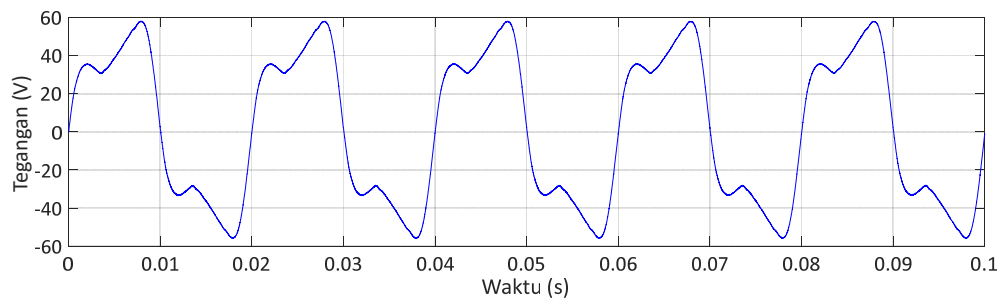
Gambar 4.4 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 30  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.



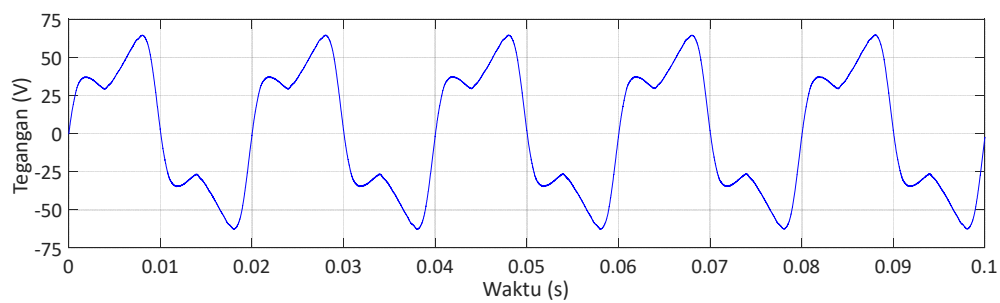
(a)



(b)

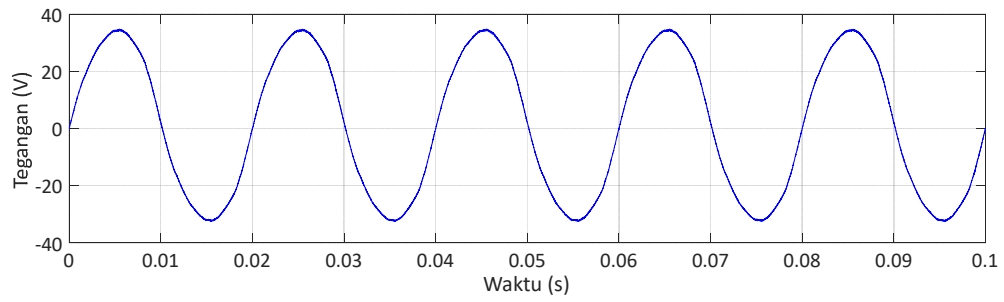


(c)

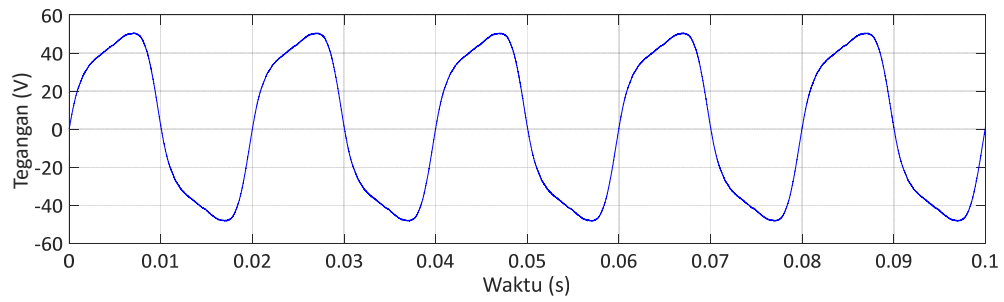


(d)

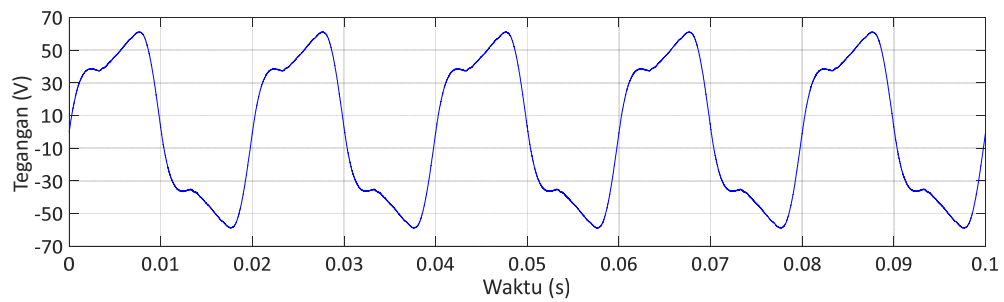
Gambar 4.5 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.



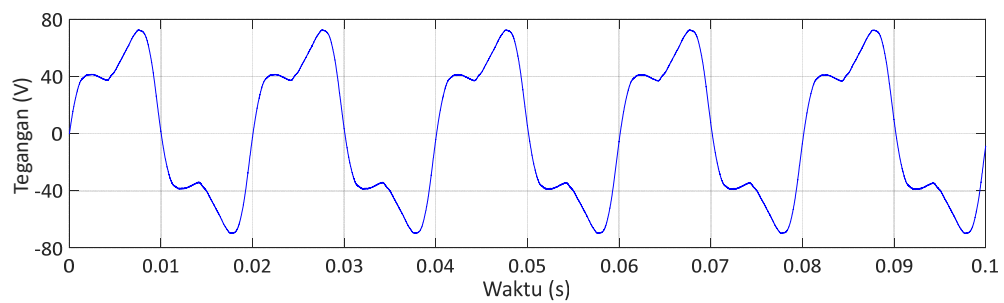
(a)



(b)

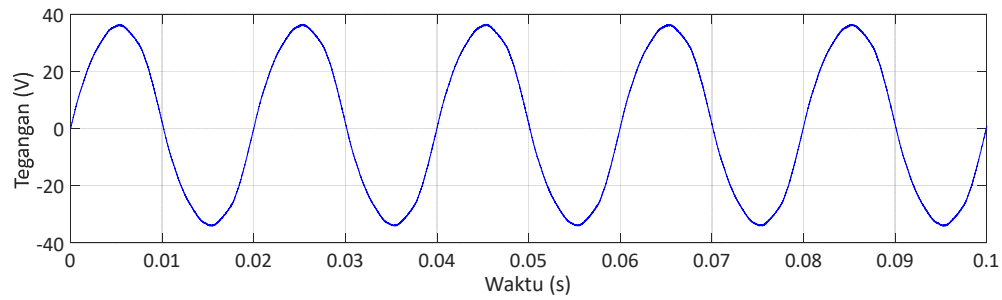


(c)

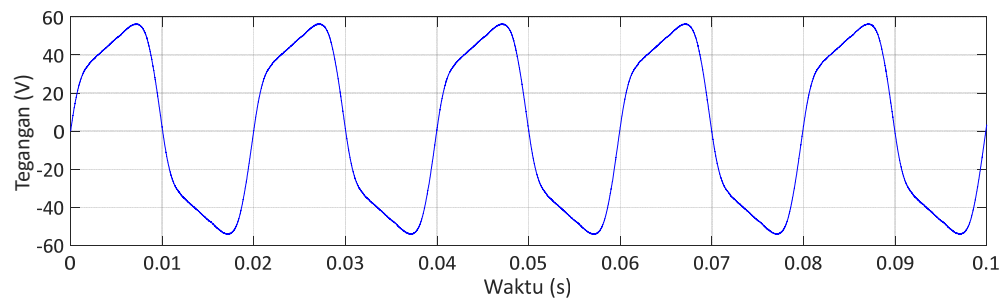


(d)

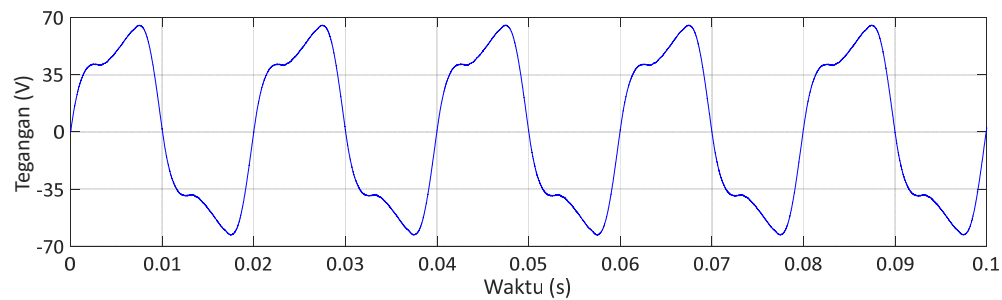
Gambar 4.6 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 80  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 17 V. b) 18 V. c) 30 V. d) 50 V.



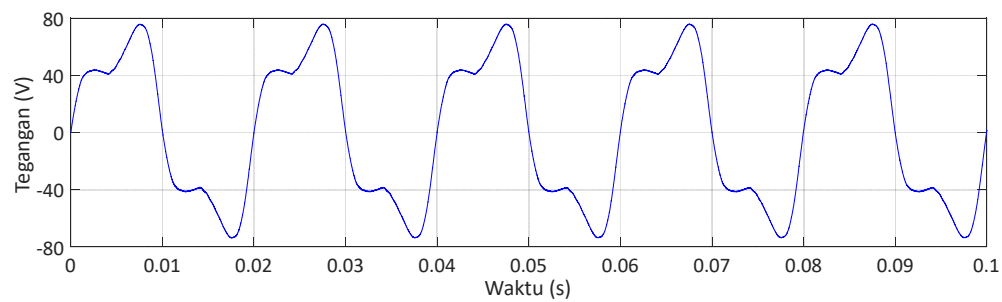
(a)



(b)

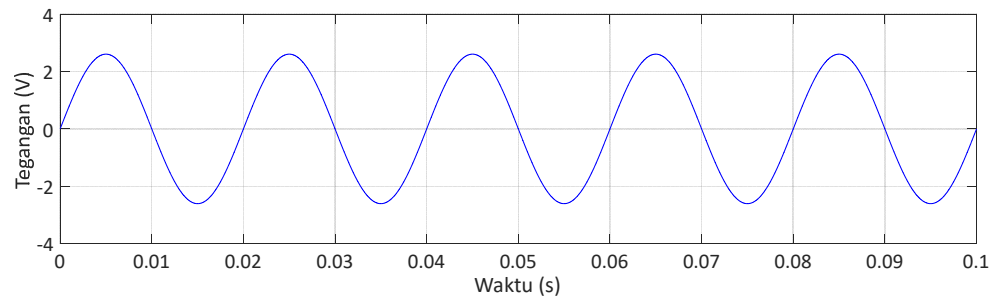


(c)

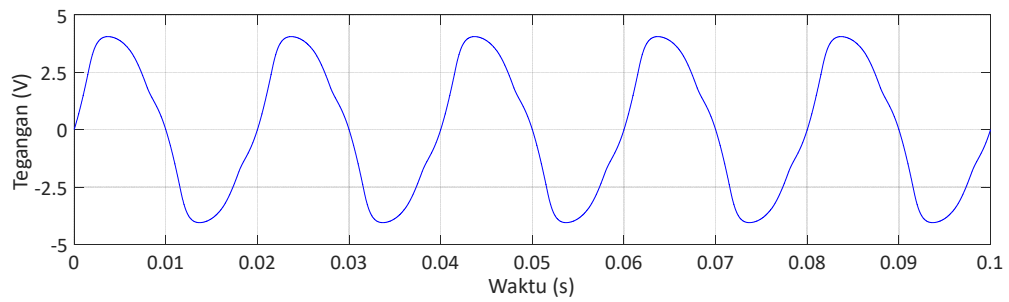


(d)

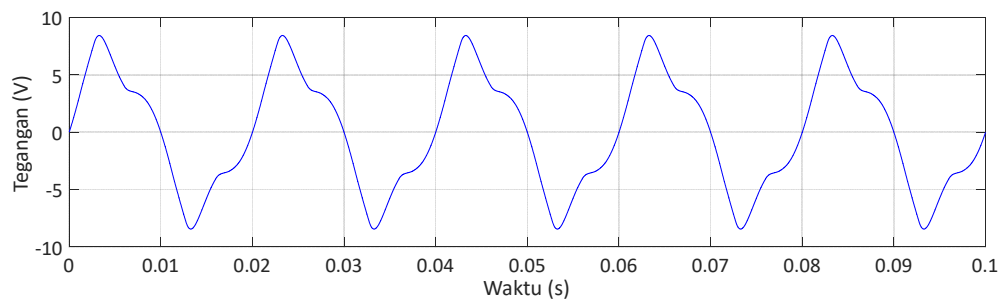
Gambar 4.7 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 100  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 18 V. b) 19 V. c) 30 V. d) 50 V.



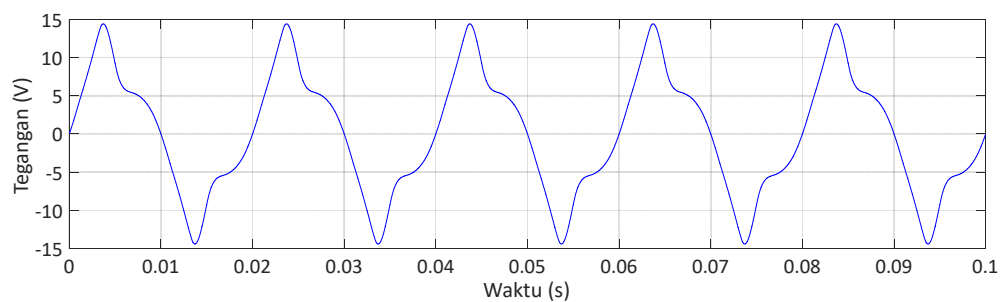
(a)



(b)

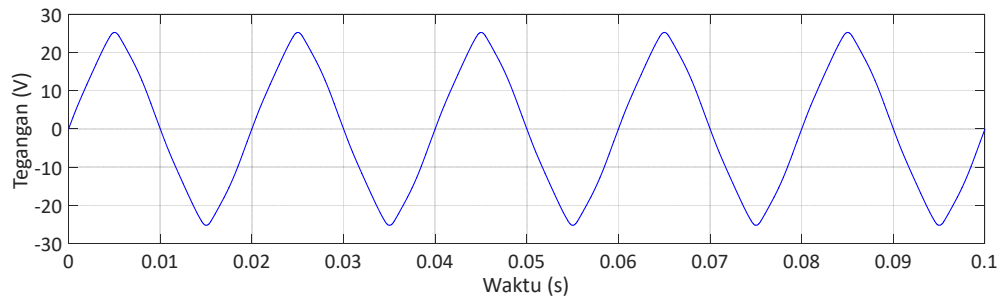


(c)

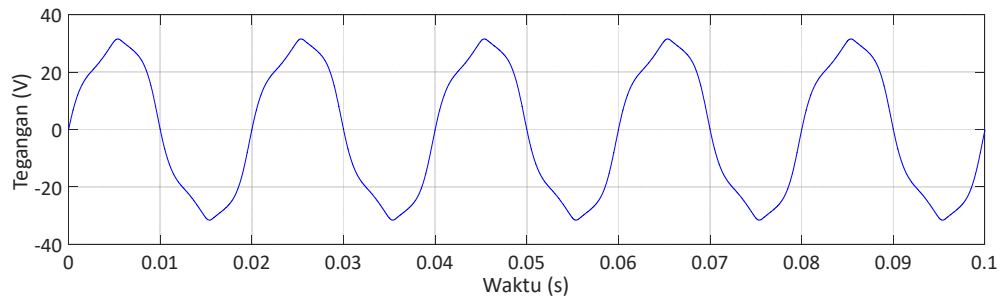


(d)

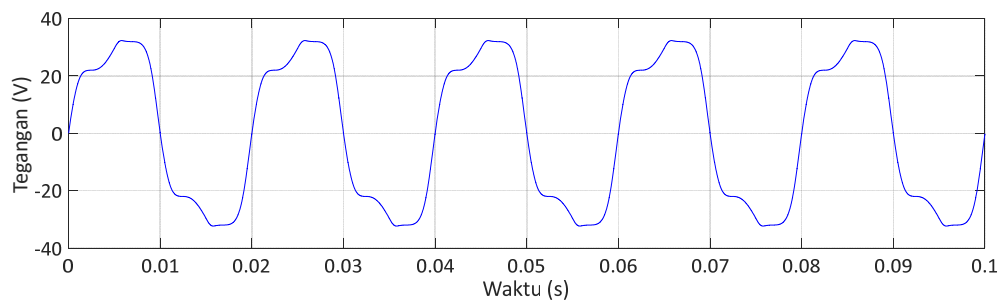
Gambar 4.8 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20 V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.



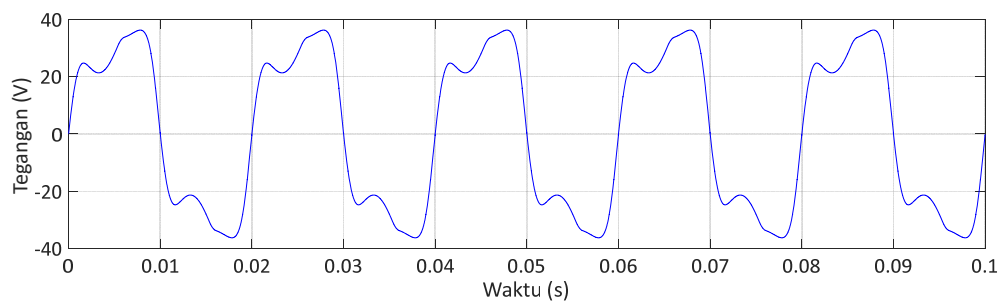
(a)



(b)

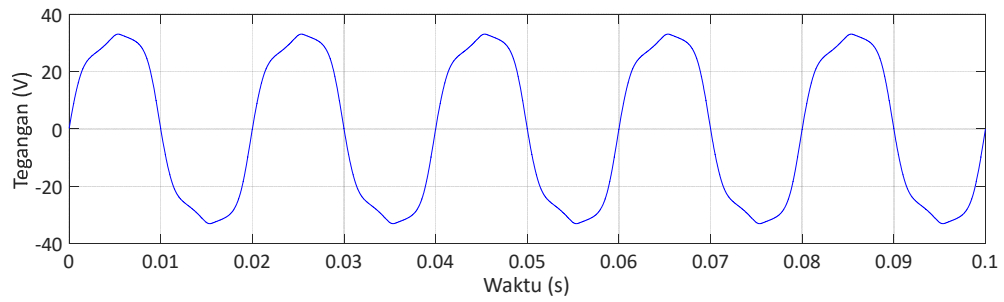


(c)

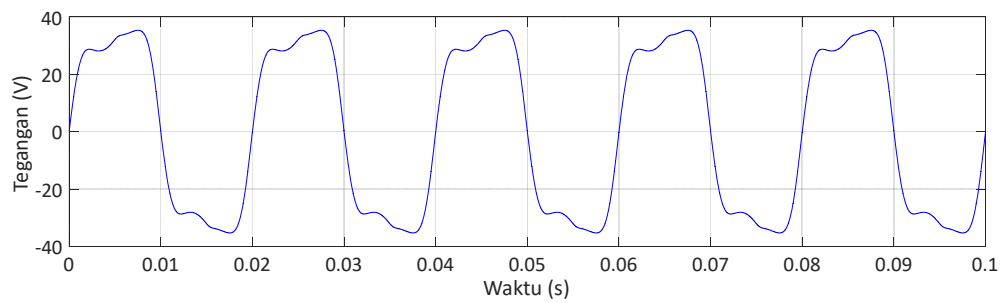


(d)

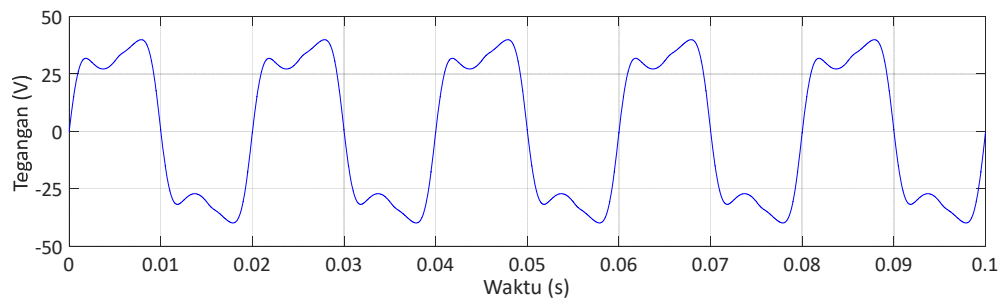
Gambar 4.9 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 30  $\mu$ F dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20 V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.



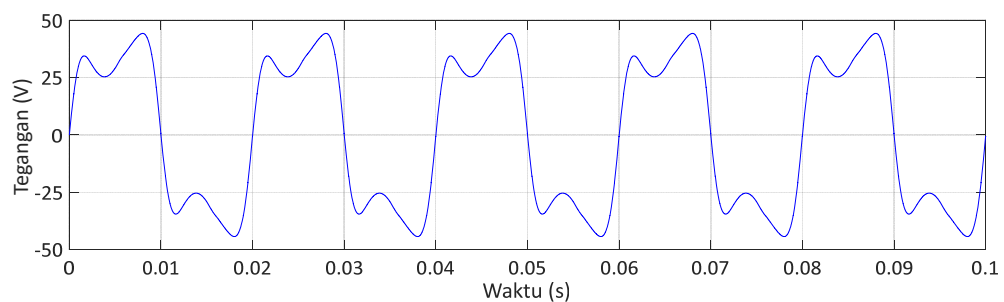
(a)



(b)

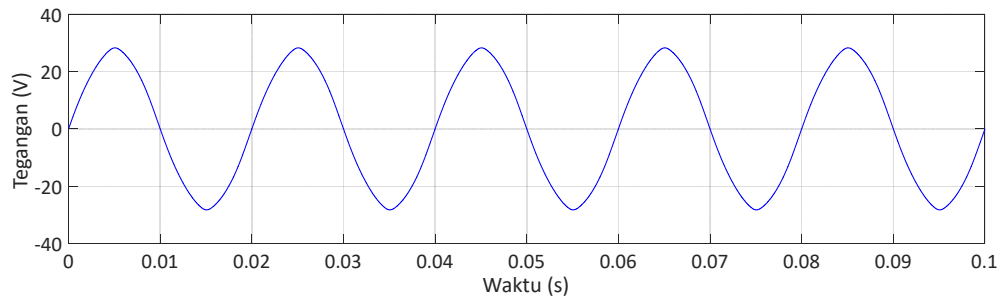


(c)

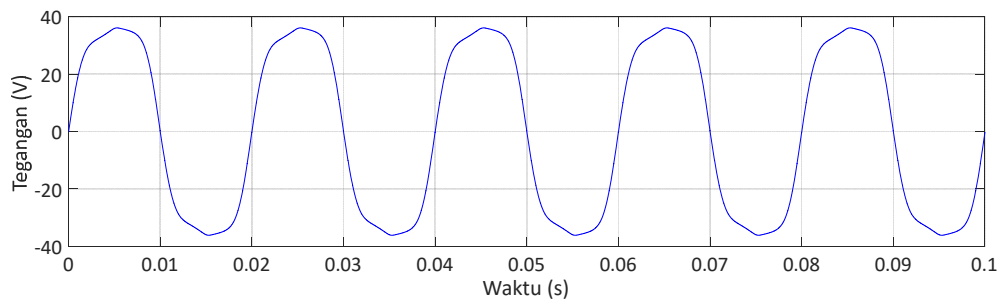


(d)

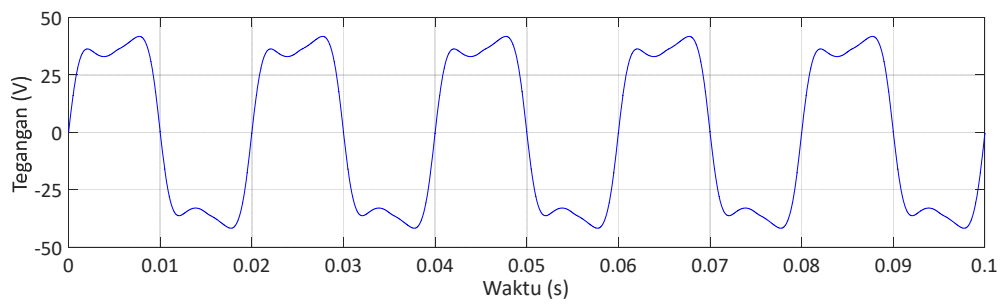
Gambar 4.10 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 20 V. b) 30 V. c) 40 V. d) 50 V.



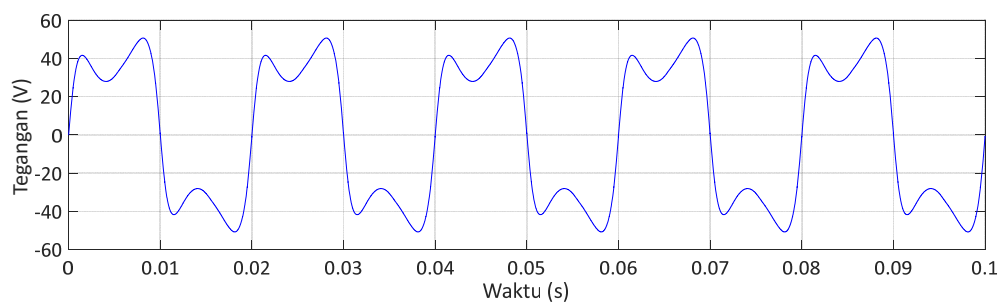
(a)



(b)



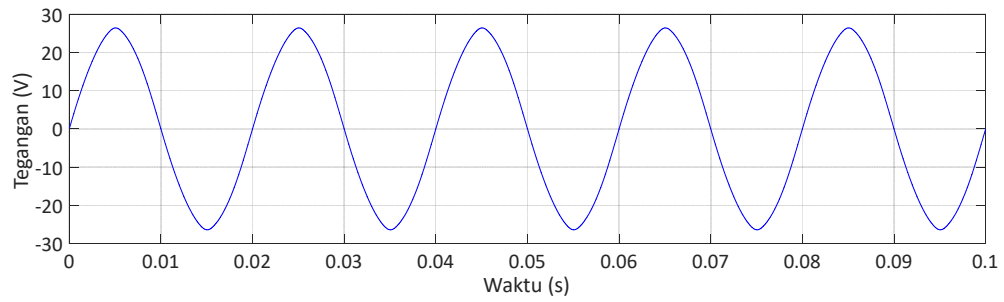
(c)



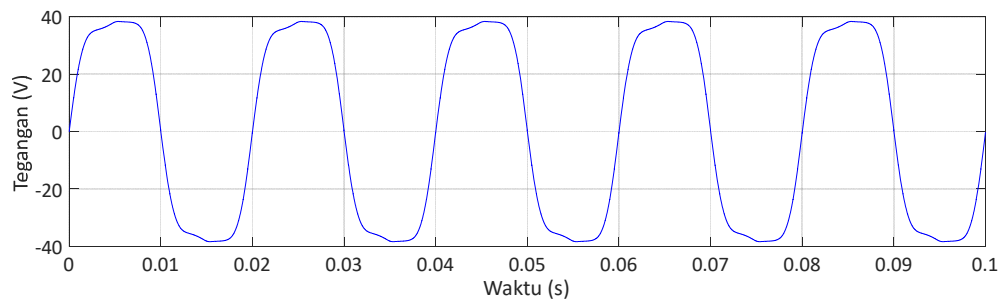
(d)

Gambar 4.11 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 80  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 13 V. b) 14 V. c) 30 V. d) 50 V.

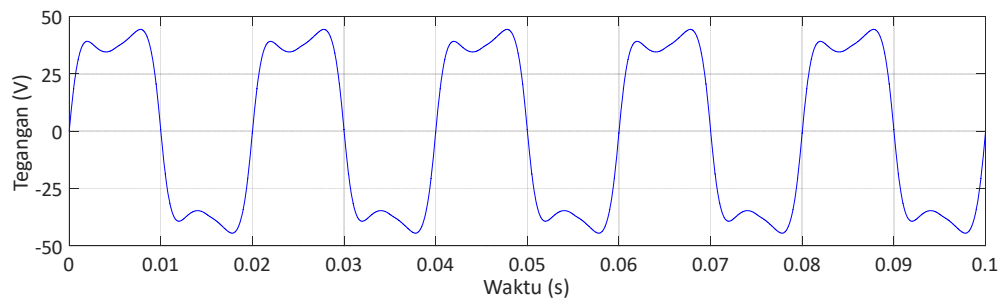




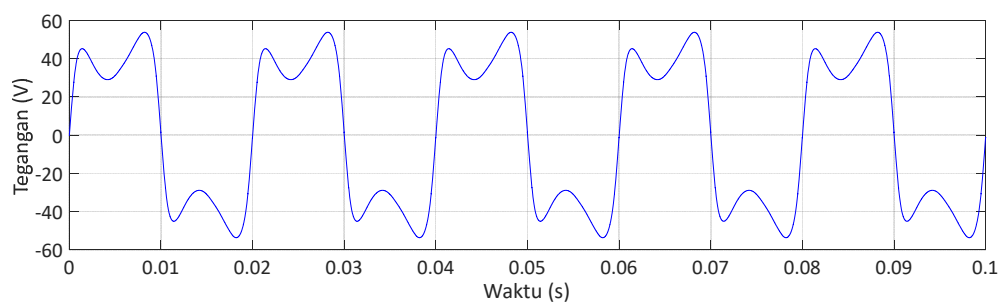
(a)



(b)



(c)

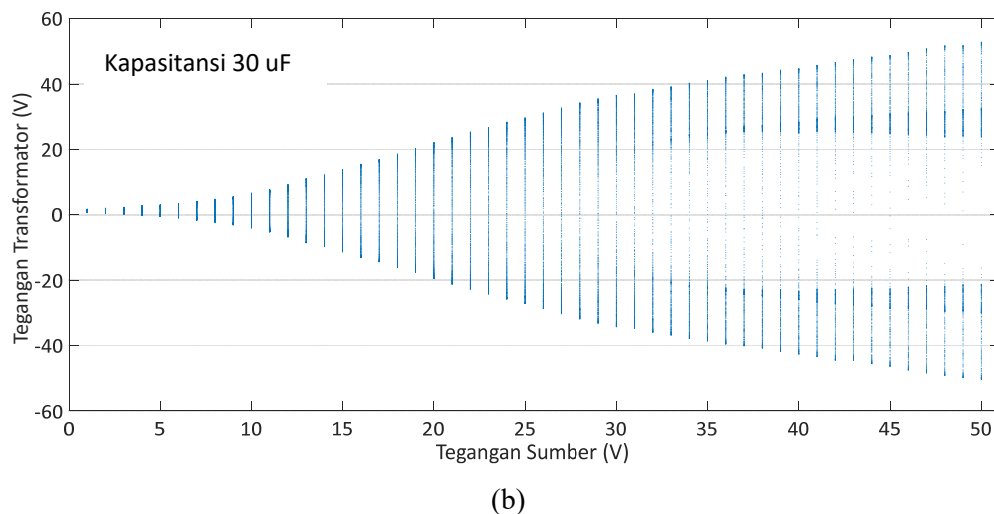
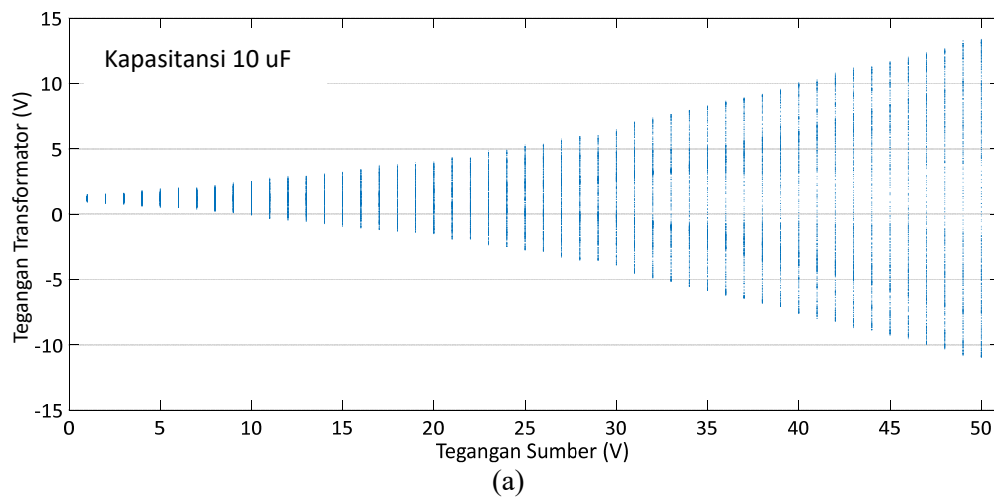


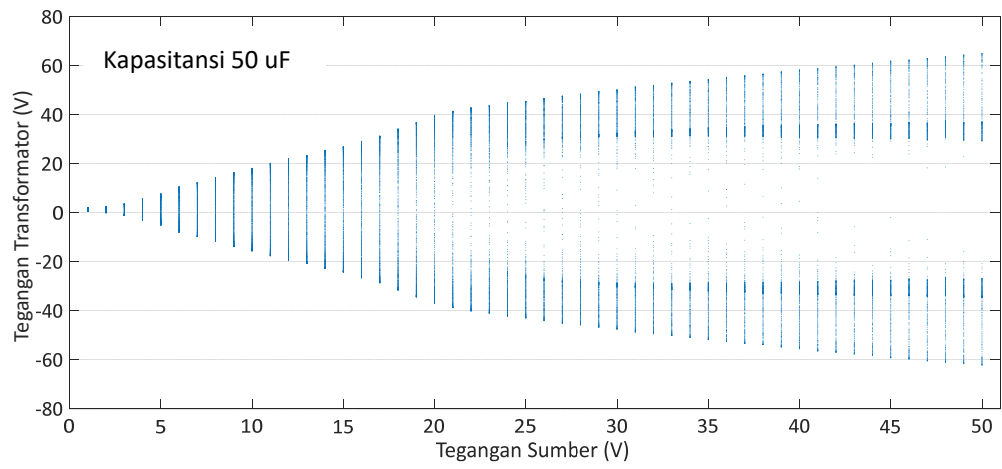
(d)

Gambar 4.12 Tegangan Primer Transformator Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 80  $\mu\text{F}$  dan Variasi Tegangan Sumber: a) 13 V. b) 14 V. c) 30 V. d) 50 V.

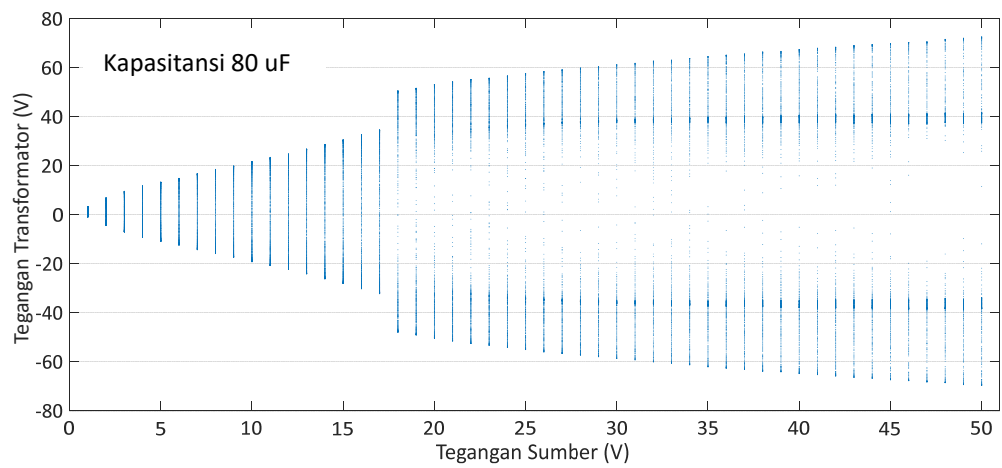
### 4.1.3 Diagram Bifurkasi

Titik-titik pada diagram bifurkasi yang diperoleh merepresentasikan nilai puncak dan riak gelombang tegangan primer transformator. Titik tertinggi pada diagram bifurkasi merupakan nilai puncak gelombang (amplitudo), sedangkan titik-titik lainnya mengindikasikan riak. Semakin banyak riak pada suatu nilai tegangan tertentu menimbulkan penumpukan titik pada diagram bifurkasi. Akibatnya, warna pada lokasi tersebut akan menjadi lebih tebal (mencolok) dibandingkan dengan lainnya (jumlah titik yang lebih sedikit).

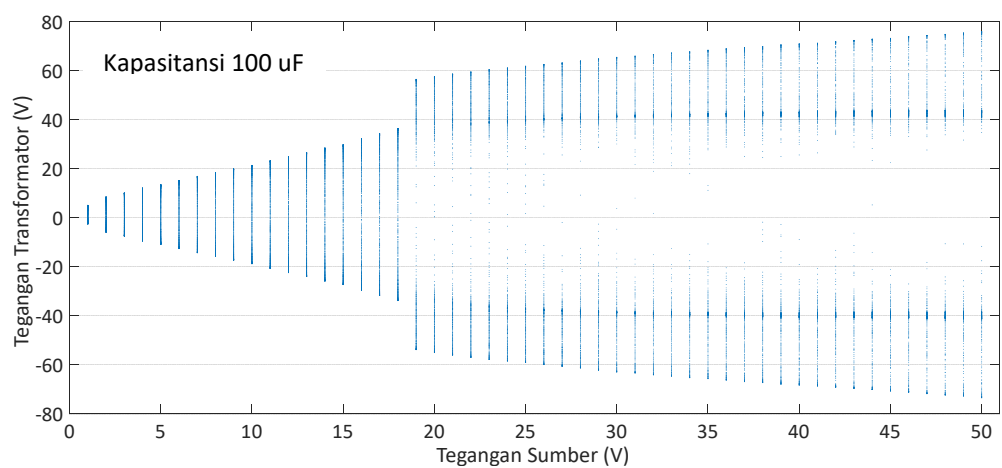




(c)

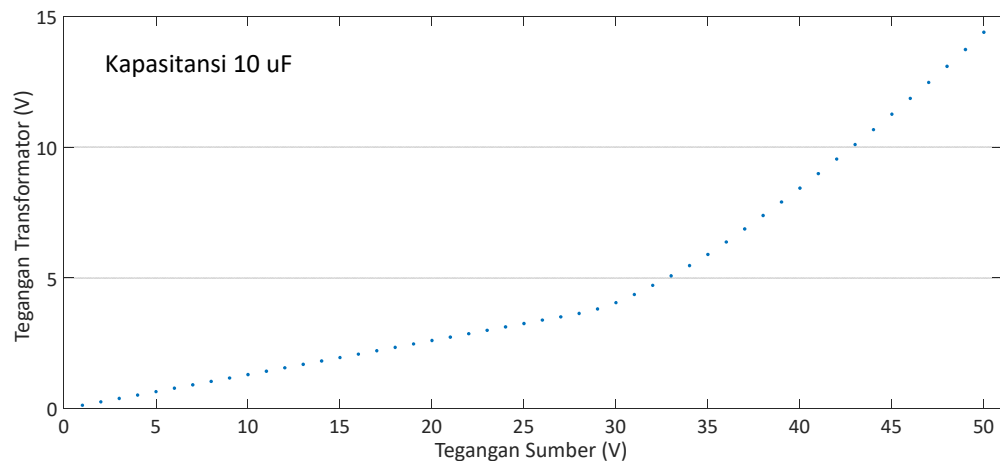


(d)

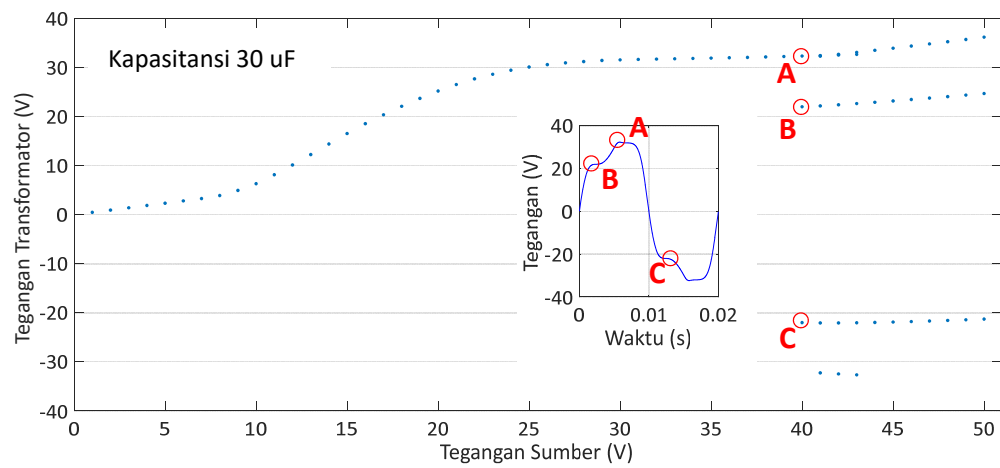


(e)

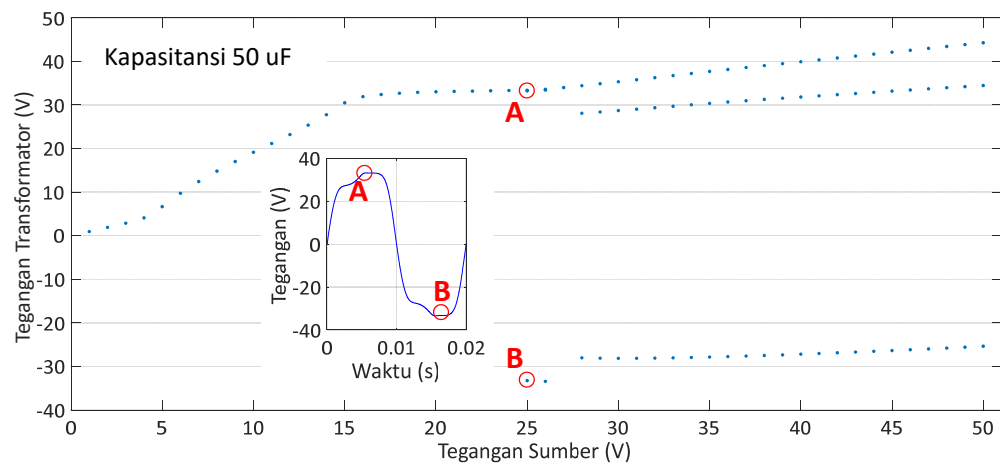
Gambar 4.13 Diagram Bifurkasi Berdasarkan Hasil Pengujian untuk Variasi Kapasitansi: a) 10 uF. b) 30 uF. c) 50 uF. d) 80 uF. e) 100 uF.



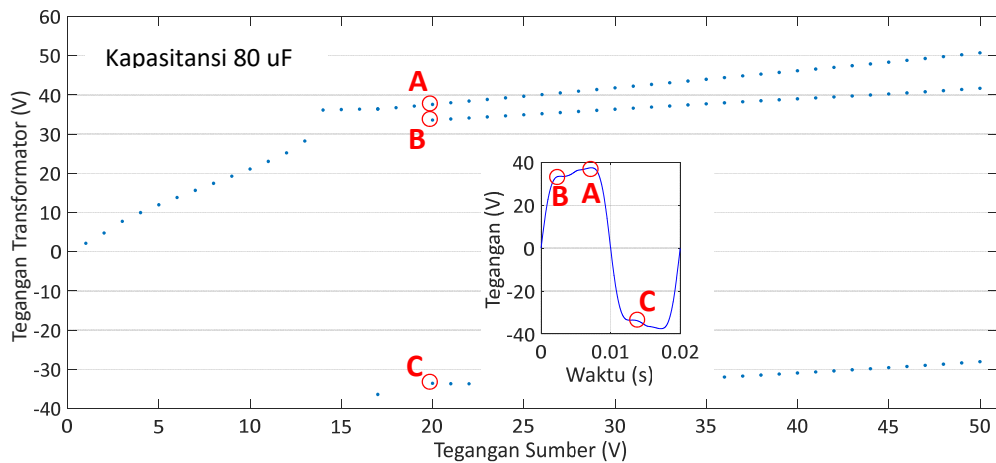
(a)



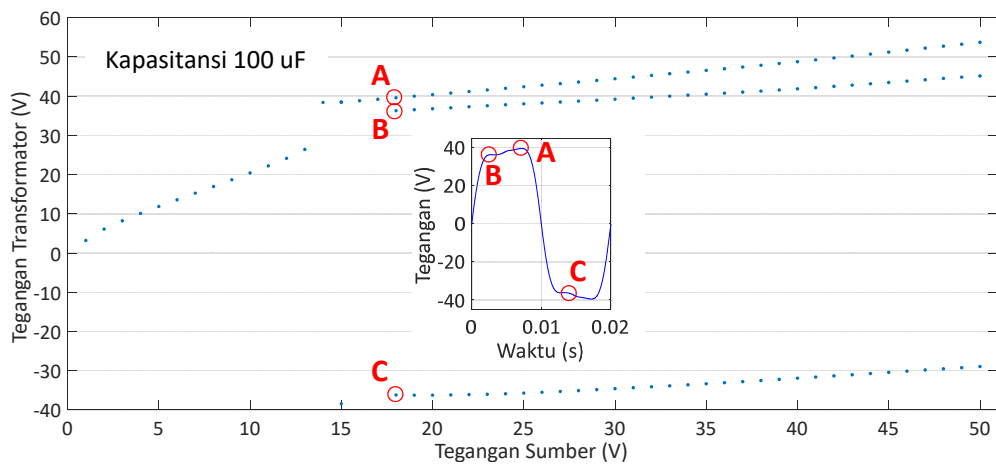
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.14 Diagram Bifurkasi Berdasarkan Hasil Simulasi untuk Variasi Kapasitansi: a) 10 uF. b) 30 uF. c) 50 uF. d) 80 uF. e) 100 uF.

Diagram bifurkasi untuk seluruh variasi kapasitansi berdasarkan hasil pengujian dapat diamati pada Gambar 4.13. Secara umum, titik tertinggi pada diagram bifurkasi untuk seluruh variasi kapasitansi cenderung meningkat seiring dengan peningkatan tegangan sumber. Namun, ketika tegangan sumber kian melebihi tegangan nominal transformator (efek saturasi), kecenderungan kenaikan titik tertinggi tersebut menjadi landai. Selain itu, perbedaan ketebalan warna semakin terlihat seiring dengan peningkatan tegangan sumber. Dalam hal ini, warna pada bagian tengah dari sumbu Y lebih tipis daripada bagian atas dan bawah. Kondisi tersebut menandakan bahwa riak gelombang lebih banyak muncul

pada nilai di sekitar puncak gelombang. Riak-riak ini tidak dapat diamati secara jelas pada bentuk gelombang seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 – 4.7. Namun, diagram bifurkasi yang diperoleh mampu menunjukkan setiap perubahan nilai pada gelombang secara lebih detil.

Perubahan nilai saat *jump phenomenon* juga dapat diamati secara lebih mudah melalui diagram bifurkasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13 (d) dan (e). Hal ini dapat dilihat dari perubahan bentuk distribusi titik pada diagram bifurkasi sebelum dan setelah pemberian tegangan sumber sekitar 18 V untuk kapasitansi 80  $\mu\text{F}$  dan 19 V untuk kapasitansi 100  $\mu\text{F}$ .

Diagram bifurkasi berdasarkan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.14. Apabila diagram bifurkasi tersebut dibandingkan dengan hasil pengujian pada Gambar 4.13, perbedaan utama yang dapat diamati adalah titik-titik yang merepresentasikan riak gelombang terlihat jauh lebih sedikit. Namun, titik-titik tersebut terletak pada lokasi yang berwarna tebal pada diagram bifurkasi berdasarkan hasil pengujian. Selain itu, nilai titik tertinggi terlihat lebih kecil.

Jumlah riak yang lebih sedikit menyebabkan efek tegangan sumber dan kapasitansi terhadap respon gelombang tegangan primer transformator lebih mudah diamati. Berdasarkan diagram bifurkasi dari hasil simulasi, kapasitansi yang semakin besar akan memunculkan respon gelombang terdistorsi pada nilai tegangan sumber yang lebih kecil. Selain itu, riak yang muncul diidentifikasi sebagai lokasi tegangan puncak yang terbelah, seperti diilustrasikan pada Gambar 4.14 (b) – (e). Hasil lainnya adalah kecenderungan kenaikan titik tertinggi seiring dengan peningkatan tegangan sumber menyerupai dengan hasil pengujian. Kecenderungan kenaikan titik tertinggi tersebut menjadi landai ketika tegangan sumber kian melebihi tegangan nominal transformator (efek saturasi).

#### **4.1.4 Spektrum Harmonisa**

Bentuk gelombang tegangan transformator yang terekam diolah menggunakan *fast fourier transform* (FFT) untuk mendapatkan spektrum harmonisa. Spektrum harmonisa berdasarkan hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.1 untuk kondisi normal (tanpa kapasitor) dan Tabel 4.2 – 4.7 untuk kondisi feroresonansi, sedangkan spektrum harmonisa berdasarkan hasil simulasi

ditunjukkan pada Tabel 4.8 – 4.12 untuk kondisi feroresonansi. Spektrum harmonisa tersebut memuat amplitudo (V) dari frekuensi harmonisa yang muncul (Hz) untuk seluruh variasi kapasitansi dan tegangan sumber yang diberikan.

Spektrum harmonisa pada pengujian kondisi normal terlihat hanya didominasi oleh frekuensi fundamental sistem (50 Hz) meskipun tegangan sumber dinaikkan hingga sekitar 50 V (melebihi tegangan nominal transformator). Hal ini dapat diamati secara mudah melalui besar grafik batang pada setiap kotak nilai dalam satu kolom. Grafik batang tersebut cenderung tidak nampak pada kotak nilai frekuensi non-fundamental (akibat nilainya terlalu kecil terhadap nilai pada frekuensi fundamental). Namun, amplitudo frekuensi ganjil cenderung bertambah dan nilai terbesarnya berada pada frekuensi ke-3 (150 Hz). Peningkatan tegangan sumber seakan tidak berpengaruh terhadap frekuensi genap, sebagaimana amplitudonya bernilai sekitar nol untuk seluruh variasi tegangan sumber.

Pada pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  (ditunjukkan pada Tabel 4.2) frekuensi ganjil bernilai cukup signifikan terhadap frekuensi fundamental. Seiring dengan peningkatan tegangan sumber, amplitudo frekuensi ganjil tersebut cenderung mengalami peningkatan seperti ditemui pada pengujian kondisi normal. Frekuensi non-fundamental didominasi oleh frekuensi ke-5 (250 Hz) ketika tegangan sumber bernilai 1 V – 24 V dan didominasi oleh frekuensi ke-3 (150 Hz) ketika tegangan sumber bernilai 25 V – 50 V. Amplitudo frekuensi genap bernilai sekitar nol untuk semua variasi tegangan sumber.

Pada variasi kapasitansi lainnya seperti ditunjukkan pada Tabel 4.3 – 4.6 frekuensi ganjil turut meningkat seiring dengan tegangan sumber yang bertambah. Frekuensi ganjil dengan amplitudo tertinggi ke terendah berada pada frekuensi berturut-turut, yaitu 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, dan 450 Hz. Amplitudo frekuensi genap bernilai sekitar nol untuk semua variasi tegangan sumber seperti ditemui pada pengujian-pengujian sebelumnya. Namun, frekuensi genap yang bernilai cukup signifikan terhadap frekuensi fundamental diamati pada pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  (tegangan sumber sebesar 1 V dan 2 V) dan 30  $\mu\text{F}$  (tegangan sumber sebesar 1 V). Hal ini dapat dijelaskan oleh amplitudo frekuensi fundamental yang terlalu rendah (mendekati nol), sehingga kemunculan frekuensi

genap yang bernilai sangat kecil (sekitar nol) menjadi terlihat signifikan. Frekuensi genap tersebut mungkin berasal dari peralatan akuisisi data.

Spektrum harmonisa berdasarkan hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.7 – 4.11. Jika spektrum harmonisa tersebut dibandingkan dengan hasil pengujian, kecenderungan frekuensi non-fundamentalnya memiliki kesamaan. Amplitudo frekuensi ganjil berbanding lurus dengan tegangan sumber, sedangkan amplitudo frekuensi genap bernilai sama dengan nol untuk seluruh variasi tegangan sumber. Besar frekuensi genap ini membuktikan bahwa kemunculan frekuensi genap pada pengujian disebabkan oleh *noise* dari peralatan akuisisi data. Di samping itu, frekuensi ganjil dengan amplitudo tertinggi ke terendah berada pada frekuensi berturut-turut, yaitu 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, dan 450 Hz.

Di sisi lain, spektrum harmonisa berdasarkan hasil simulasi menunjukkan bahwa besar kapasitansi berpengaruh terhadap kemunculan frekuensi ganjil. Dalam hal ini, semakin besar kapasitansi menyebabkan frekuensi ganjil muncul pada tegangan sumber yang lebih kecil. Frekuensi ganjil mulai muncul pada tegangan sumber sebesar 27 V untuk kapasitansi 10 uF, 8 V untuk kapasitansi 30 uF, 5 V untuk kapasitansi 50 uF, dan 2 V untuk kapasitansi 80 uF dan 100 uF. Karakteristik ini tidak diamati pada spektrum harmonisa berdasarkan hasil pengujian, sebagaimana frekuensi ganjil muncul sejak pemberian tegangan sumber sebesar 1 V.

Berdasarkan spektrum harmonisa yang diperoleh, baik dari hasil pengujian maupun simulasi, kemunculan frekuensi non-fundamental yang hanya didominasi oleh frekuensi ganjil menunjukkan bahwa respon feroresonansi pada tegangan primer transformator untuk semua variasi kapasitansi dan tegangan sumber diidentifikasi sebagai mode fundamental. Hal ini juga didukung oleh bentuk gelombang pada Gambar 4.3 – 4.12 yang memiliki periode sebesar 20 ms. Artinya, variasi kapasitansi dan tegangan sumber yang diberikan tidak berpengaruh terhadap mode feroresonansi yang muncul. Hasil ini dapat dijelaskan oleh kurva magnetisasi inti yang sangat dipengaruhi oleh jenis material inti. Kualitas material inti H18 pada transformator yang diuji tergolong paling rendah. Kualitas material inti dari terbaik hingga terendah berturut-turut adalah Z, M, dan H. Selain itu, bentuk inti EI memiliki rugi-rugi yang lebih besar daripada toroidal.



Tabel 4.1 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian Kondisi Normal (Tanpa Kapasitor)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	1.92	3.62	4.78	6.59	7.92	9.37	10.67	12.17	13.78	14.93	16.52	17.69	19.23	20.89	22.05	23.60	25.11	26.21	28.10	29.61	30.65	32.18	33.87	35.03	36.66
100	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.05	0.01	0.04	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.07	0.06	0.03	0.04
150	0.02	0.05	0.12	0.06	0.10	0.09	0.19	0.14	0.14	0.26	0.19	0.24	0.18	0.20	0.24	0.26	0.21	0.28	0.26	0.27	0.32	0.32	0.32	0.38	0.40
200	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
250	0.03	0.04	0.07	0.07	0.10	0.11	0.14	0.14	0.16	0.17	0.17	0.19	0.19	0.20	0.20	0.22	0.26	0.25	0.26	0.30	0.28	0.30	0.32	0.33	0.32
300	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
350	0.02	0.03	0.03	0.06	0.07	0.08	0.08	0.11	0.12	0.13	0.15	0.15	0.17	0.20	0.20	0.21	0.22	0.24	0.27	0.26	0.28	0.30	0.33	0.32	0.33
400	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
450	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.12	0.11
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	37.69	39.47	40.84	42.08	43.78	45.11	46.45	48.46	49.59	51.79	52.87	54.34	55.67	56.93	58.46	60.14	61.81	63.34	64.65	66.43	67.32	69.32	70.81	72.47	74.07
100	0.01	0.05	0.04	0.02	0.09	0.03	0.02	0.03	0.04	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.11	0.07	0.08	0.04	0.05	0.14	0.24	0.43	0.43
150	0.39	0.46	0.48	0.50	0.57	0.59	0.61	0.73	0.79	0.94	0.92	0.99	1.15	1.12	1.22	1.40	1.46	1.65	1.74	1.96	2.03	2.26	2.33	2.59	3.00
200	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.04	0.08	0.10	0.20
250	0.33	0.35	0.37	0.39	0.40	0.44	0.48	0.54	0.61	0.61	0.65	0.68	0.73	0.77	0.79	0.81	0.83	0.88	0.88	0.90	0.88	0.89	0.92	0.94	0.92
300	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.04	0.05	0.10
350	0.33	0.34	0.35	0.38	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.47	0.48	0.51	0.54	0.54	0.55	0.57	0.59	0.59	0.59	0.60	0.55	0.59	0.58	0.62	0.58
400	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.08	0.10	0.12
450	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.24	0.24	0.28	0.29	0.31	0.30	0.33	0.30	0.35	0.33
500	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.04	0.05

Tabel 4.2 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 10 uF

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	0.09	0.15	0.21	0.26	0.35	0.41	0.47	0.57	0.69	0.80	0.91	1.00	1.07	1.20	1.31	1.42	1.60	1.69	1.87	1.99	2.12	2.21	2.49	2.59	2.84
100	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01
150	0.01	0.01	0.02	0.02	0.05	0.04	0.03	0.04	0.06	0.11	0.14	0.10	0.13	0.17	0.16	0.25	0.24	0.30	0.31	0.31	0.43	0.42	0.58	0.58	0.73
200	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
250	0.04	0.05	0.08	0.16	0.17	0.20	0.17	0.24	0.28	0.34	0.45	0.51	0.50	0.53	0.60	0.59	0.65	0.67	0.58	0.62	0.70	0.69	0.70	0.72	0.69
300	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03
350	0.05	0.05	0.06	0.11	0.11	0.13	0.13	0.17	0.17	0.19	0.20	0.24	0.24	0.27	0.26	0.26	0.31	0.30	0.30	0.34	0.36	0.38	0.37	0.41	0.43
400	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
450	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07	0.11	0.12	0.10	0.11	0.12	0.11	0.11	0.13	0.12
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	2.97	3.21	3.43	3.50	3.78	4.27	4.49	4.78	5.08	5.31	5.69	6.02	6.32	6.67	7.15	7.49	7.85	8.31	8.57	8.93	9.30	9.85	10.18	10.68	11.02
100	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.06	0.05	0.07	0.06	0.08	0.04	0.07	0.09	0.07
150	0.73	0.88	1.00	0.93	1.07	1.29	1.44	1.56	1.73	1.86	2.07	2.19	2.32	2.47	2.71	2.78	2.98	3.16	3.27	3.43	3.56	3.71	3.77	4.07	3.98
200	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.06	0.06	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
250	0.67	0.67	0.67	0.68	0.63	0.57	0.57	0.51	0.47	0.48	0.42	0.44	0.53	0.54	0.67	0.73	0.84	0.91	1.00	1.12	1.17	1.23	1.31	1.48	1.41
300	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04
350	0.45	0.47	0.47	0.51	0.55	0.57	0.59	0.60	0.63	0.63	0.63	0.67	0.66	0.65	0.64	0.65	0.62	0.62	0.63	0.62	0.63	0.61	0.61	0.61	0.60
400	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0.04	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
450	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.18	0.17	0.17	0.19	0.17	0.19	0.21	0.22	0.22	0.21	0.24	0.24	0.22	0.23	0.26	0.25	0.25	0.24	0.26	0.24
500	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02

Tabel 4.3 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 30  $\mu\text{F}$ 

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	0.27	0.59	0.92	1.34	1.68	2.12	2.90	3.59	4.45	5.57	6.89	8.38	10.38	11.71	13.42	15.44	16.96	18.73	20.39	22.24	23.90	25.50	26.93	28.60	29.89
100	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.00	0.07	0.10	0.06	0.02	0.07	0.08	0.13	0.12	0.04	0.12	0.10	0.09	0.07
150	0.02	0.09	0.10	0.08	0.30	0.23	0.32	0.54	0.53	0.64	0.86	0.88	1.00	1.17	1.22	1.40	1.60	1.71	1.90	2.12	2.33	2.54	2.81	3.07	3.38
200	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04	0.03
250	0.02	0.04	0.06	0.08	0.09	0.09	0.12	0.19	0.19	0.26	0.32	0.31	0.33	0.36	0.32	0.29	0.28	0.25	0.22	0.22	0.19	0.20	0.25	0.30	0.38
300	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
350	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.12	0.12	0.13	0.16	0.17	0.20	0.23	0.22	0.24	0.24	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.26	0.30	0.32
400	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
450	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.10	0.10
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	31.46	32.92	34.57	35.67	36.84	37.17	38.30	38.96	39.68	40.17	40.75	41.10	41.40	41.81	42.06	42.38	42.77	42.93	43.21	43.43	43.72	44.06	44.24	44.34	44.62
100	0.00	0.02	0.05	0.11	0.02	0.15	0.07	0.03	0.03	0.12	0.07	0.33	0.02	0.02	0.64	0.19	0.21	0.47	0.34	0.27	0.17	0.28	0.32	0.19	0.10
150	3.81	4.13	4.83	5.36	6.19	6.36	7.33	8.09	8.99	9.51	10.21	10.96	11.42	12.19	12.57	13.39	14.00	14.36	14.90	15.42	16.04	16.50	17.24	17.56	18.02
200	0.01	0.04	0.05	0.08	0.04	0.06	0.07	0.02	0.01	0.06	0.12	0.21	0.04	0.01	0.33	0.08	0.11	0.29	0.19	0.13	0.10	0.10	0.16	0.18	0.08
250	0.53	0.63	0.89	1.13	1.51	1.59	2.06	2.44	2.85	3.02	3.30	3.65	3.78	4.09	4.22	4.52	4.65	4.78	4.95	5.07	5.25	5.33	5.57	5.71	5.71
300	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.05	0.01	0.02	0.04	0.11	0.12	0.05	0.03	0.14	0.06	0.06	0.16	0.10	0.06	0.07	0.05	0.08	0.15	0.03
350	0.37	0.43	0.51	0.61	0.76	0.77	0.91	1.05	1.10	1.09	1.06	1.10	1.05	1.04	0.99	0.98	0.86	0.86	0.83	0.84	0.86	0.84	0.99	1.08	1.06
400	0.01	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.00	0.00	0.03	0.07	0.06	0.03	0.01	0.06	0.05	0.03	0.09	0.05	0.02	0.04	0.04	0.05	0.10	0.02
450	0.11	0.13	0.16	0.19	0.24	0.26	0.30	0.35	0.35	0.33	0.26	0.28	0.23	0.20	0.17	0.16	0.15	0.17	0.24	0.24	0.34	0.36	0.47	0.52	0.53
500	0.00	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.00	0.01	0.03	0.06	0.03	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.07	0.01

Tabel 4.4 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 50 uF

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	0.61	1.28	2.45	4.52	6.49	9.57	11.61	13.71	15.81	17.64	19.73	21.61	23.05	25.28	26.71	29.12	31.33	34.57	37.73	41.32	42.96	44.10	44.81	45.65	46.06
100	0.01	0.03	0.03	0.01	0.06	0.04	0.03	0.06	0.04	0.03	0.03	0.08	0.02	0.04	0.04	0.04	0.06	0.02	0.02	0.09	0.03	0.06	0.16	0.09	0.01
150	0.03	0.12	0.25	0.24	0.38	0.52	0.66	0.75	0.92	1.03	1.20	1.26	1.42	1.59	1.71	1.95	2.24	2.90	3.88	5.77	6.92	7.91	8.72	9.62	0.19
200	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.06	0.01	0.03	0.05	0.05	0.02
250	0.02	0.04	0.09	0.10	0.13	0.09	0.03	0.07	0.14	0.21	0.28	0.33	0.39	0.43	0.49	0.55	0.60	0.69	0.80	1.04	1.47	1.94	2.35	2.77	3.03
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02
350	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.08	0.10	0.12	0.15	0.18	0.20	0.23	0.23	0.27	0.30	0.32	0.34	0.29	0.17	0.50	0.75	0.88	0.94	0.97
400	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01
450	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.06	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10	0.12	0.14	0.16	0.01	0.13	0.22	0.25	0.24	0.23
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	46.67	47.16	47.51	47.96	48.30	48.79	49.05	49.45	49.70	49.98	50.38	50.59	50.81	51.09	51.34	51.55	51.78	52.03	52.23	52.47	52.67	52.87	53.08	53.18	53.35
100	0.03	0.03	0.07	0.14	0.03	0.05	0.03	0.13	0.12	0.15	0.10	0.08	0.22	0.07	0.14	0.16	0.18	0.06	0.10	0.15	0.38	0.28	1.27	0.11	0.10
150	11.03	11.72	12.21	12.85	13.33	14.00	14.48	14.97	15.46	15.94	16.40	16.83	17.25	17.66	18.09	18.61	18.98	19.42	19.69	20.21	20.58	20.89	21.24	21.64	22.09
200	0.02	0.04	0.07	0.09	0.05	0.04	0.05	0.03	0.07	0.10	0.04	0.05	0.12	0.02	0.09	0.10	0.10	0.04	0.09	0.07	0.19	0.15	0.65	0.09	0.05
250	3.36	3.62	3.82	3.99	4.09	4.22	4.34	4.38	4.47	4.55	4.53	4.61	4.65	4.73	4.78	4.86	4.89	4.93	4.94	5.03	5.05	5.10	5.09	5.22	5.30
300	0.03	0.06	0.06	0.08	0.06	0.04	0.05	0.02	0.07	0.08	0.02	0.04	0.05	0.02	0.06	0.04	0.06	0.01	0.06	0.04	0.07	0.09	0.22	0.05	0.02
350	0.94	0.89	0.85	0.78	0.70	0.60	0.59	0.55	0.59	0.64	0.67	0.77	0.85	0.93	1.03	1.14	1.22	1.28	1.33	1.45	1.49	1.59	1.63	1.71	1.76
400	0.02	0.03	0.05	0.05	0.03	0.02	0.03	0.00	0.04	0.05	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04	0.07	0.04	0.01
450	0.19	0.14	0.11	0.07	0.08	0.13	0.17	0.21	0.26	0.30	0.32	0.36	0.37	0.39	0.40	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.45	0.45	0.42	0.44	0.48
500	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.02	0.01

Tabel 4.5 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 80 uF

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	2.14	5.76	8.49	10.66	12.42	13.93	15.86	17.60	19.06	20.88	22.50	24.08	26.04	28.06	30.00	32.24	34.34	51.79	52.61	53.46	54.08	54.56	54.94	55.39	55.81
100	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.05	0.03	0.00	0.04	0.01	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.09	0.11	0.23	0.03	0.13	0.04	0.06	0.06
150	0.16	0.23	0.35	0.39	0.49	0.53	0.61	0.67	0.74	0.81	0.86	0.97	1.03	1.15	1.30	1.51	1.77	9.45	10.35	11.19	11.92	12.43	12.86	13.44	13.90
200	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.07	0.05	0.12	0.02	0.06	0.04	0.02	0.03
250	0.03	0.02	0.10	0.12	0.16	0.19	0.22	0.23	0.25	0.26	0.29	0.32	0.34	0.36	0.41	0.48	0.57	2.09	2.51	2.84	3.09	3.24	3.32	3.46	3.53
300	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	0.00	0.02
350	0.01	0.04	0.05	0.07	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.13	0.15	0.17	0.17	0.18	0.19	0.58	0.69	0.66	0.60	0.54	0.46	0.38	0.31
400	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
450	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.12	0.16	0.14	0.11	0.07	0.05	0.01	0.03
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	56.25	56.58	56.94	57.20	57.58	57.80	58.15	58.38	58.65	59.07	59.25	59.51	59.77	59.91	60.24	60.46	60.65	60.86	61.07	61.23	61.45	61.56	61.82	61.99	62.11
100	0.07	0.13	0.09	0.07	0.03	0.04	0.23	0.03	0.11	0.06	0.09	0.16	0.04	0.10	0.09	0.04	0.27	0.07	0.28	0.16	0.02	0.20	0.76	0.25	1.01
150	14.46	14.88	15.25	15.67	16.18	16.45	16.91	17.35	17.75	18.18	18.49	18.78	19.15	19.48	19.86	20.22	20.43	20.85	21.13	21.45	21.77	22.01	22.34	22.62	22.90
200	0.03	0.06	0.06	0.04	0.01	0.02	0.12	0.08	0.12	0.04	0.07	0.09	0.09	0.11	0.05	0.04	0.11	0.12	0.14	0.13	0.10	0.18	0.37	0.14	0.48
250	3.61	3.66	3.67	3.76	3.80	3.82	3.87	3.92	3.97	3.92	3.97	3.95	3.98	4.03	4.00	4.04	4.02	4.10	4.09	4.14	4.14	4.21	4.19	4.23	4.25
300	0.02	0.03	0.05	0.03	0.01	0.01	0.07	0.07	0.10	0.03	0.05	0.04	0.06	0.09	0.03	0.04	0.05	0.09	0.07	0.08	0.07	0.12	0.16	0.08	0.21
350	0.28	0.30	0.33	0.40	0.50	0.55	0.65	0.76	0.82	0.89	0.96	0.99	1.04	1.12	1.15	1.22	1.25	1.32	1.35	1.39	1.45	1.48	1.49	1.50	1.55
400	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.04	0.07	0.02	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.04	0.03	0.07	0.04	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10
450	0.07	0.11	0.14	0.17	0.20	0.22	0.25	0.28	0.30	0.29	0.31	0.31	0.34	0.35	0.31	0.33	0.32	0.34	0.32	0.33	0.35	0.35	0.32	0.32	0.33
500	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.04	0.05	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.08

Tabel 4.6 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 100 uF

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	3.85	7.31	9.01	10.96	12.36	14.17	15.84	17.33	18.93	20.37	22.33	24.07	25.68	27.55	29.01	31.40	33.68	35.90	56.91	57.54	58.11	58.54	59.02	59.37	59.71
100	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.04	0.06	0.06	0.03	0.03	0.05	0.01	0.06	0.01	0.06	0.05	0.01	0.03	0.06	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.10
150	0.18	0.28	0.34	0.33	0.40	0.47	0.49	0.55	0.57	0.63	0.73	0.77	0.85	0.96	1.03	1.17	1.38	1.63	11.59	12.28	12.92	13.38	13.85	14.26	14.71
200	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.07	0.07	0.05	0.03	0.10	0.06	0.06
250	0.01	0.08	0.11	0.12	0.15	0.16	0.15	0.19	0.19	0.22	0.25	0.25	0.27	0.31	0.34	0.38	0.44	0.52	2.77	2.94	3.06	3.12	3.14	3.18	3.22
300	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.05	0.05	0.03	0.01	0.06	0.03	0.02
350	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.12	0.13	0.13	0.15	0.15	0.14	0.15	0.52	0.46	0.39	0.32	0.22	0.20	0.23
400	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01
450	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.10	0.09	0.07	0.05	0.02	0.03	0.07
500	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	60.13	60.46	60.84	61.23	61.52	61.76	62.11	62.35	62.62	62.86	63.13	63.37	63.61	63.89	64.07	64.18	64.47	64.73	64.89	65.04	65.27	65.54	65.68	65.84	66.01
100	0.08	0.01	0.10	0.09	0.04	0.07	0.04	0.17	0.01	0.16	0.05	0.20	0.12	0.07	0.12	0.06	0.10	0.25	0.30	0.23	0.34	0.14	0.13	0.13	0.10
150	5.12	5.53	5.91	6.30	6.74	7.11	7.45	7.82	8.16	8.45	8.80	9.12	9.41	9.74	20.09	20.37	20.66	20.96	21.23	21.54	21.83	22.03	22.38	22.65	22.96
200	0.06	0.02	0.08	0.09	0.04	0.04	0.05	0.09	0.01	0.08	0.02	0.10	0.06	0.07	0.05	0.07	0.05	0.12	0.14	0.10	0.17	0.13	0.06	0.08	0.06
250	3.21	3.23	3.20	3.20	3.25	3.28	3.27	3.30	3.32	3.32	3.36	3.39	3.38	3.39	3.48	3.54	3.54	3.54	3.56	3.66	3.66	3.61	3.70	3.72	3.82
300	0.04	0.01	0.04	0.07	0.02	0.01	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.04	0.03	0.05	0.02	0.05	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.09	0.02	0.04	0.03
350	0.28	0.34	0.41	0.47	0.55	0.62	0.68	0.76	0.80	0.86	0.91	0.94	0.98	1.00	1.05	1.10	1.11	1.12	1.16	1.20	1.21	1.19	1.23	1.24	1.27
400	0.02	0.00	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.03	0.03	0.02
450	0.09	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20	0.19	0.22	0.23	0.23	0.24	0.23	0.22	0.21	0.24	0.25	0.22	0.19	0.19	0.21	0.20	0.14	0.14	0.13	0.13
500	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02

Tabel 4.7 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 10 uF

[illegible]

Tabel 4.8 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 30 uF

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	0.47	0.94	1.41	1.87	2.34	2.81	3.28	3.84	4.65	5.69	7.10	8.72	10.51	12.38	14.28	16.13	17.85	19.53	21.14	22.69	24.14	25.48	26.66	27.76	28.73
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.42	0.70	1.00	1.20	1.35	1.48	1.56	1.61	1.61	1.59	1.54	1.42	1.26	1.07	0.87	0.83	1.01
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06	0.04	0.15	0.27	0.36	0.42	0.47	0.51	0.54	0.56	0.59	0.63	0.68	0.74	0.84	0.91	1.01
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
350	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00	0.06	0.11	0.15	0.17	0.20	0.22	0.23	0.25	0.25	0.26	0.27	0.26	0.27	0.28
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.05	0.07	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	29.53	30.21	30.79	31.32	31.74	32.10	32.43	32.74	33.03	33.30	33.56	33.80	34.02	34.24	34.45	34.64	34.81	34.97	35.13	35.28	35.43	35.57	35.72	35.86	35.99
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	1.36	1.78	2.24	2.71	3.22	3.73	4.24	4.73	5.21	5.67	6.12	6.55	6.98	7.39	7.79	8.19	8.58	8.97	9.35	9.73	10.10	10.47	10.83	11.20	11.58
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250	1.13	1.25	1.39	1.51	1.67	1.83	1.99	2.14	2.29	2.42	2.56	2.69	2.82	2.94	3.05	3.17	3.29	3.41	3.53	3.64	3.75	3.86	3.96	4.06	4.16
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
350	0.28	0.28	0.29	0.30	0.31	0.34	0.37	0.41	0.44	0.48	0.51	0.55	0.59	0.63	0.67	0.72	0.76	0.81	0.86	0.91	0.96	1.00	1.05	1.09	1.14
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450	0.14	0.14	0.14	0.13	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



75

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																													
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V					
50	0.96	1.92	2.88	4.02	6.19	8.86	11.30	13.51	15.61	17.65	19.64	21.70	23.96	26.64	30.14	32.61	33.84	34.69	35.35	35.88	36.33	36.73	37.10	37.43	37.73					
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
150	0.00	0.00	0.00	0.12	0.50	0.74	0.86	0.94	0.98	0.99	0.97	0.90	0.77	0.50	0.95	2.30	3.32	4.08	4.74	5.34	5.90	6.42	6.90	7.36	7.81					
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
250	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.16	0.22	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37	0.41	0.51	0.72	1.08	1.35	1.54	1.70	1.86	2.01	2.16	2.29	2.41	2.54					
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
350	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.07	0.09	0.11	0.12	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.22	0.24	0.26	0.28	0.31					
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
450	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.11	0.11	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09					
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																													
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V					
50	38.01	38.28	38.53	38.77	39.01	39.23	39.42	39.61	39.79	39.96	40.13	40.29	40.43	40.58	40.71	40.84	40.97	41.10	41.22	41.35	41.47	41.58	41.68	41.78	41.87					
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
150	8.25	8.68	9.10	9.50	9.90	10.31	10.72	11.14	11.56	11.95	12.31	12.67	13.02	13.37	13.71	14.05	14.39	14.73	15.06	15.39	15.72	16.05	16.38	16.71	17.04					
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
250	2.66	2.78	2.90	3.00	3.11	3.22	3.35	3.48	3.60	3.72	3.82	3.92	4.02	4.12	4.22	4.33	4.43	4.53	4.62	4.72	4.82	4.92	5.02	5.13	5.24					
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
350	0.34	0.37	0.39	0.41	0.44	0.47	0.50	0.54	0.59	0.62	0.66	0.69	0.73	0.78	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.05	1.09	1.14	1.20	1.26	1.32					
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
450	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.27	0.29	0.31					
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					

Tabel 4.10 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 80 uF

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
50	2.16	4.66	7.34	9.41	11.28	13.05	14.79	16.55	18.33	20.16	22.12	24.37	27.66	40.73	41.31	41.79	42.21	42.58	42.92	43.23	43.52	43.78	44.01	44.22	44.42
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	0.00	0.16	0.39	0.48	0.54	0.58	0.60	0.61	0.61	0.60	0.55	0.45	0.27	6.62	7.25	7.81	8.34	8.84	9.33	9.78	10.19	10.60	11.01	11.41	11.81
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250	0.00	0.02	0.05	0.10	0.13	0.15	0.17	0.19	0.20	0.21	0.23	0.26	0.34	1.73	1.88	2.01	2.15	2.28	2.42	2.54	2.66	2.78	2.91	3.05	3.18
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
350	0.00	0.01	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.30	0.34	0.39	0.44
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
50	44.62	44.81	44.99	45.16	45.32	45.47	45.60	45.73	45.85	45.97	46.07	46.15	46.22	46.28	46.34	46.39	46.45	46.50	46.54	46.59	46.63	46.67	46.70	46.73	46.75
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	12.21	12.59	12.97	13.35	13.73	14.12	14.52	14.91	15.29	15.67	16.07	16.47	16.88	17.28	17.67	18.06	18.44	18.82	19.20	19.59	19.98	20.38	20.78	21.19	21.60
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250	3.31	3.44	3.57	3.69	3.82	3.96	4.10	4.25	4.39	4.54	4.70	4.87	5.05	5.23	5.40	5.57	5.73	5.90	6.06	6.23	6.40	6.57	6.75	6.94	7.13
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
350	0.48	0.53	0.57	0.61	0.66	0.72	0.78	0.84	0.90	0.96	1.03	1.12	1.22	1.31	1.41	1.51	1.60	1.70	1.79	1.89	1.99	2.09	2.20	2.31	2.42
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450	0.16	0.18	0.19	0.20	0.22	0.24	0.26	0.29	0.31	0.33	0.36	0.40	0.45	0.49	0.54	0.59	0.63	0.68	0.72	0.76	0.80	0.84	0.89	0.93	0.98
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 4.11 Spektrum Harmonisa Berdasarkan Hasil Simulasi dengan Kapasitansi 100 uF

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																													
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V					
50	3.19	5.88	7.84	9.61	11.30	12.94	14.58	16.24	17.93	19.65	21.46	23.43	25.80	44.56	44.96	45.31	45.63	45.92	46.20	46.45	46.67	46.87	47.06	47.24	47.38					
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
150	0.00	0.22	0.33	0.39	0.43	0.46	0.48	0.49	0.49	0.48	0.45	0.40	0.28	8.45	8.97	9.45	9.91	10.35	10.78	11.20	11.63	12.06	12.48	12.90	13.35					
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
250	0.00	0.01	0.05	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.24	2.02	2.18	2.33	2.47	2.60	2.73	2.86	3.01	3.16	3.30	3.45	3.63					
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
350	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.42	0.47	0.53	0.58	0.66					
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
450	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.27					
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)																													
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V					
50	47.50	47.61	47.70	47.80	47.88	47.96	48.04	48.12	48.18	48.23	48.28	48.33	48.37	48.41	48.45	48.48	48.51	48.54	48.57	48.60	48.63	48.66	48.69	48.73	48.76					
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
150	13.80	14.25	14.69	15.13	15.57	16.01	16.43	16.85	17.26	17.68	18.09	18.49	18.90	19.32	19.74	20.16	20.58	20.99	21.41	21.83	22.25	22.66	23.06	23.45	23.82					
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
250	3.82	4.01	4.21	4.40	4.59	4.78	4.97	5.15	5.33	5.52	5.70	5.89	6.08	6.27	6.46	6.66	6.85	7.05	7.24	7.43	7.63	7.82	7.99	8.16	8.31					
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
350	0.75	0.84	0.94	1.03	1.12	1.22	1.31	1.39	1.49	1.59	1.69	1.79	1.89	1.99	2.10	2.20	2.30	2.41	2.51	2.61	2.72	2.82	2.92	3.01	3.10					
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
450	0.31	0.35	0.39	0.43	0.47	0.51	0.55	0.58	0.63	0.68	0.73	0.77	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.24	1.28	1.32					
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					

#### 4.1.5 *Total Harmonic Distortion (THD)*

Amplitudo frekuensi-frekuensi pada spektrum harmonisa dihitung nilai THD-nya untuk mengetahui tingkat harmonisa gelombang tegangan. Semakin besar prosentase THD maka semakin buruk bentuk suatu gelombang (terdiri dari banyak gelombang sinusoidal pada frekuensi selain 50 Hz). Hasil penghitungan THD berdasarkan pengujian kondisi normal (tanpa kapasitor) ditunjukkan pada Gambar 4.15 (a), sedangkan THD berdasarkan pengujian kondisi feroresonansi (dengan kapasitor) ditunjukkan pada Gambar 4.15 (b) – (f) dan Tabel 4.12. Pada hasil pengujian kondisi normal nilai THD cenderung meningkat seiring dengan peningkatan tegangan sumber. Nilai THD maksimal yang diperoleh yaitu sekitar 4.5 % pada tegangan sumber sebesar 50 V.

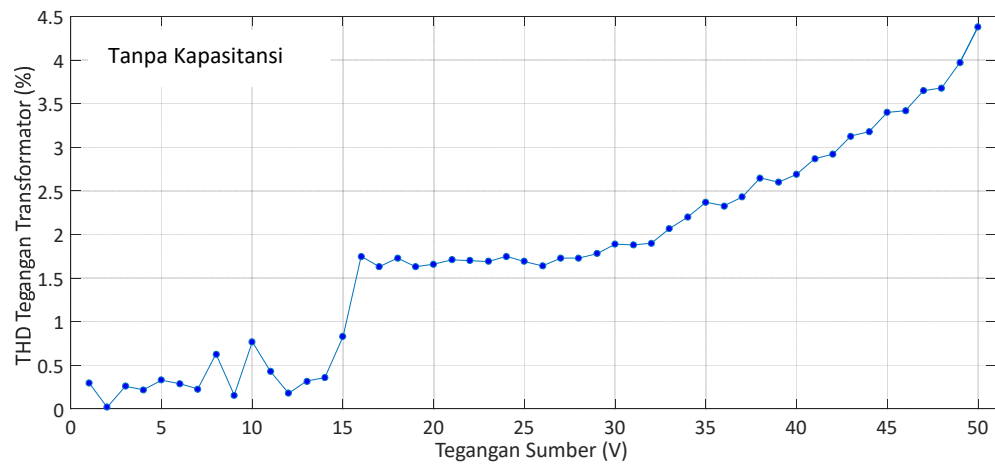
Kecenderungan berbeda ditemui pada hasil pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$ . THD cenderung menurun dari 76.98 % pada tegangan sumber 1 V hingga bernilai 35.93 % pada tegangan sumber 31 V. Kemudian THD bertambah seiring dengan peningkatan tegangan sumber dan berada pada nilai yang relatif konstan, yaitu sekitar 40 %. Nilai THD yang sangat tinggi pada awal pemberian tegangan sumber dapat dijelaskan oleh adanya interaksi antara inti transformator dan kapasitor yang menghasilkan tegangan transformator sangat kecil (kurang dari 1 V untuk tegangan sumber = 1 V – 15 V dan berkisar 1 V – 2 V untuk tegangan sumber = 16 V – 26 V). Akibatnya, bentuk gelombang mudah dipengaruhi oleh *noise*. Hal ini didukung oleh bentuk gelombang yang diperoleh menyerupai bentuk gelombang ketika sensor Verivolt tidak terhubung dengan transformator.

Di samping itu, jika diamati dari puncak gelombang yang terbelah maka bentuk gelombang pada tegangan sumber 20 V dan 30 V (Gambar 4.4 (a) dan (b)) lebih buruk daripada tegangan sumber 40 V dan 50 V (Gambar 4.4 (c) dan (d)). Akan tetapi, nilai THD pada tegangan sumber 40 V justru lebih tinggi daripada tegangan sumber 20 V dan 30 V. Hal ini berarti bahwa bentuk gelombang feroresonansi pada tegangan sumber 40 V lebih berbahaya ketimbang bentuk gelombang feroresonansi pada tegangan sumber 20 V dan 30 V. Adapun bentuk gelombang pada tegangan sumber 40 V tersebut juga ditemui pada variasi kapasitansi lainnya.

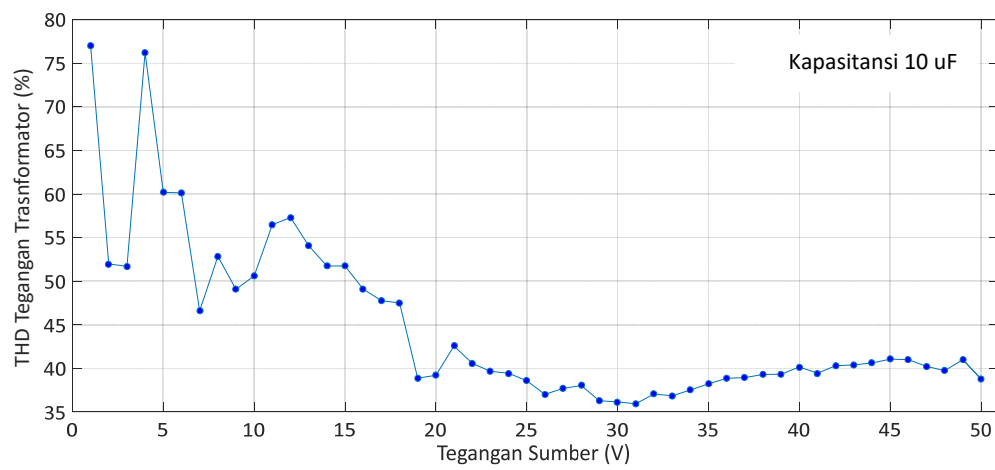
Pada hasil pengujian dengan kapasitansi 30  $\mu\text{F}$  nilai THD cenderung fluktuatif pada tegangan sumber sebesar 1 V – 15 V. Kemudian THD mengalami peningkatan secara perlahan pada tegangan sumber sebesar 16 V – 22 V. Lalu, kenaikan THD menjadi signifikan pada tegangan sumber sebesar 23 V – 50 V. Kecenderungan kenaikan THD ini sesuai dengan kecenderungan bentuk gelombang pada Gambar 4.5 (a) – (e) yang terlihat semakin buruk seiring dengan peningkatan tegangan sumber.

Kecenderungan THD yang semula terlihat fluktuatif dan kemudian meningkat secara perlahan serta pada akhirnya meningkat secara signifikan turut ditemui pada pengujian dengan kapasitansi 50  $\mu\text{F}$ , 80  $\mu\text{F}$ , dan 100  $\mu\text{F}$ . Akan tetapi, perubahan kondisi tersebut terjadi pada tegangan sumber yang sedikit berbeda. Perubahan THD dari fluktuatif menjadi meningkat secara perlahan ditemui sejak pemberian tegangan sumber sebesar 6.3 V (THD = 5.66 %) untuk kapasitansi 50  $\mu\text{F}$ , 4.63 V (THD = 3.87 %) untuk kapasitansi 80  $\mu\text{F}$ , dan 4.56 V (THD = 3.39 %) untuk kapasitansi 100  $\mu\text{F}$ . Kemudian peningkatan THD secara signifikan mulai terlihat pada tegangan sumber yang hampir sama, yaitu 18.45 V untuk kapasitansi 50  $\mu\text{F}$ , 18.23 V untuk kapasitansi 80  $\mu\text{F}$ , dan 19.53 V untuk kapasitansi 100  $\mu\text{F}$ . Apabila tegangan transformator diamati pada besar tegangan sumber tersebut maka peningkatan THD secara signifikan terjadi pada area inti transformator bersaturasi. Di samping itu, *jump phenomenon* pada pengujian dengan kapasitansi 80  $\mu\text{F}$  dan 100  $\mu\text{F}$  dapat diamati pada besar tegangan tersebut dengan kenaikan THD yang tergolong paling signifikan, yaitu dari 5.45 % menjadi 18.73 % untuk kapasitansi 80  $\mu\text{F}$  dan dari 4.78 % menjadi 20.96 % untuk kapasitansi 100  $\mu\text{F}$ .

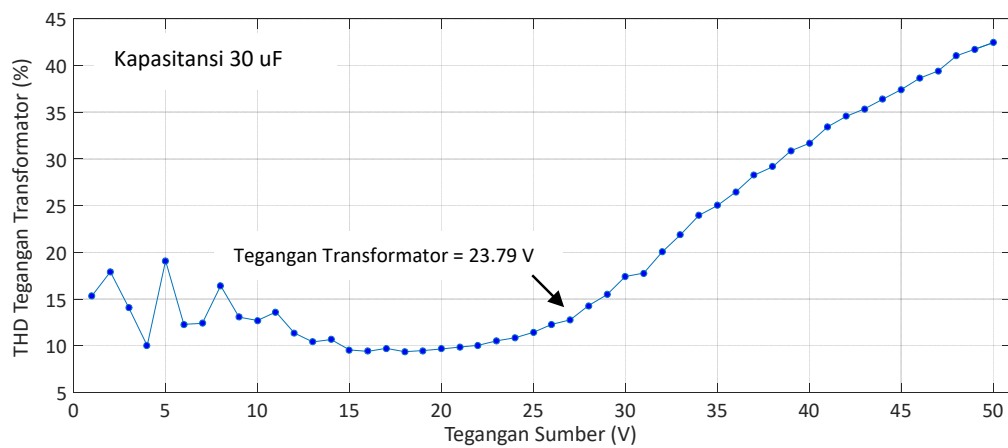
Jika nilai THD maksimal yang diperoleh pada tegangan sumber 50 V dibandingkan untuk seluruh variasi kapasitansi, perbedaan nilai THD tersebut tidak terlalu signifikan, yaitu 38.79 % untuk kapasitansi 10  $\mu\text{F}$ , 42.5 % untuk kapasitansi 30  $\mu\text{F}$ , 42.7 % untuk kapasitansi 50  $\mu\text{F}$ , 37.6 % untuk kapasitansi 80  $\mu\text{F}$ , dan 35.3 % untuk kapasitansi 100  $\mu\text{F}$ . Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar kapasitansi maka tidak berarti kecenderungan kenaikan THD menjadi lebih signifikan (curam). Namun, besar kapasitansi menyebabkan fluktuasi nilai THD (ditemui pada awal pemberian tegangan sumber) berkurang.



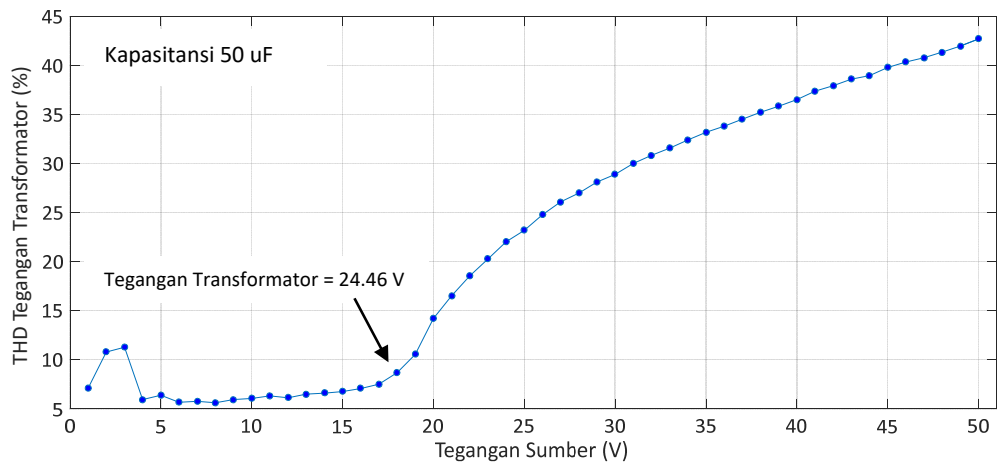
(a)



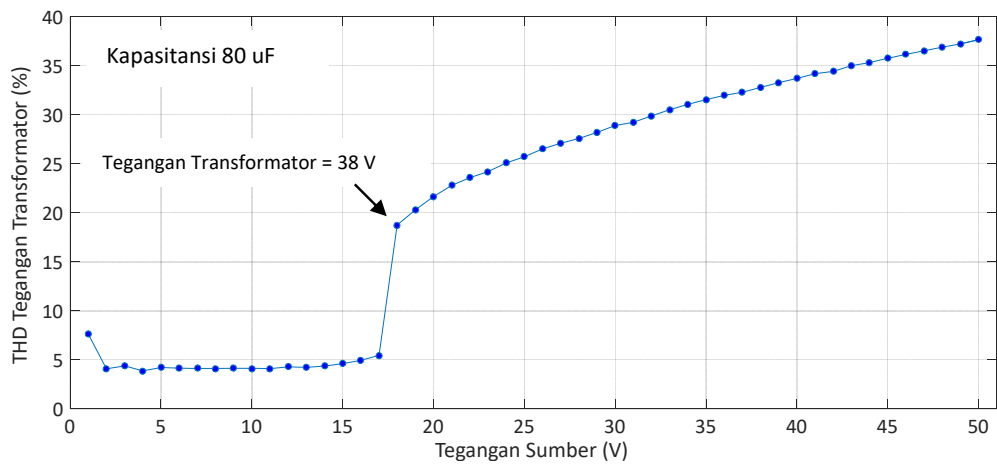
(b)



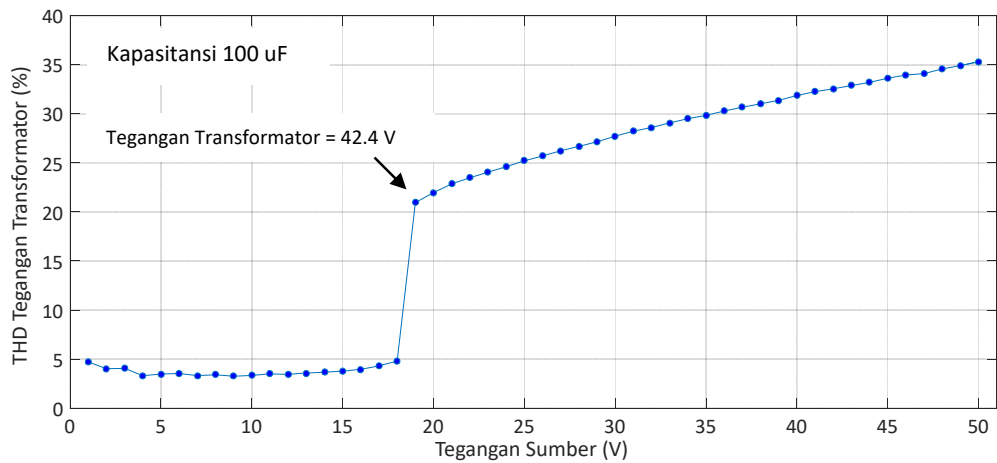
(c)



(d)

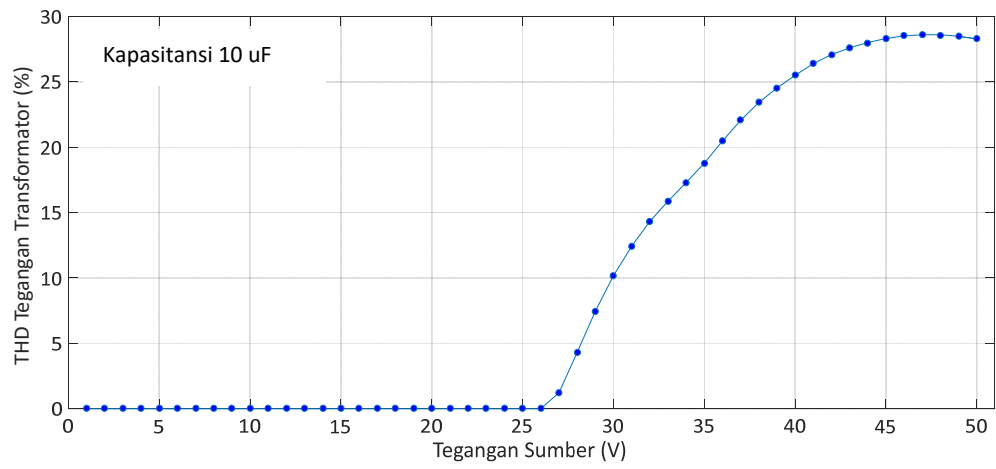


(e)

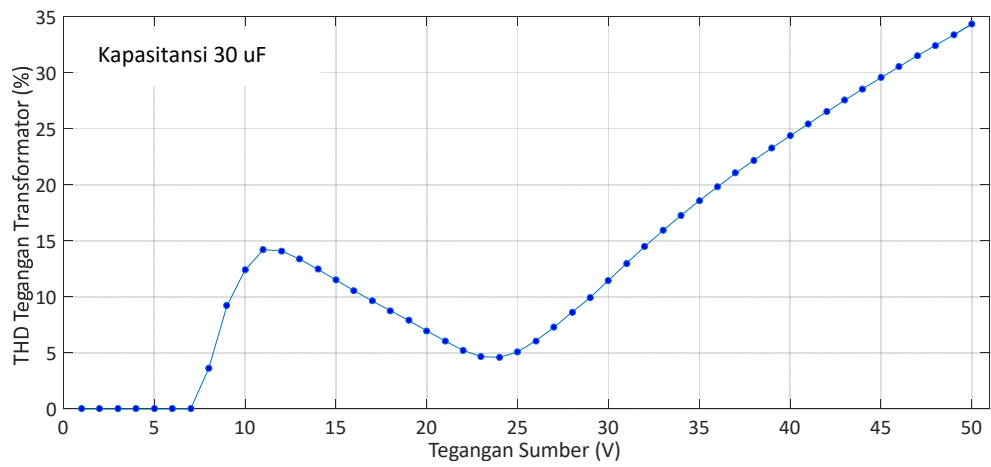


(f)

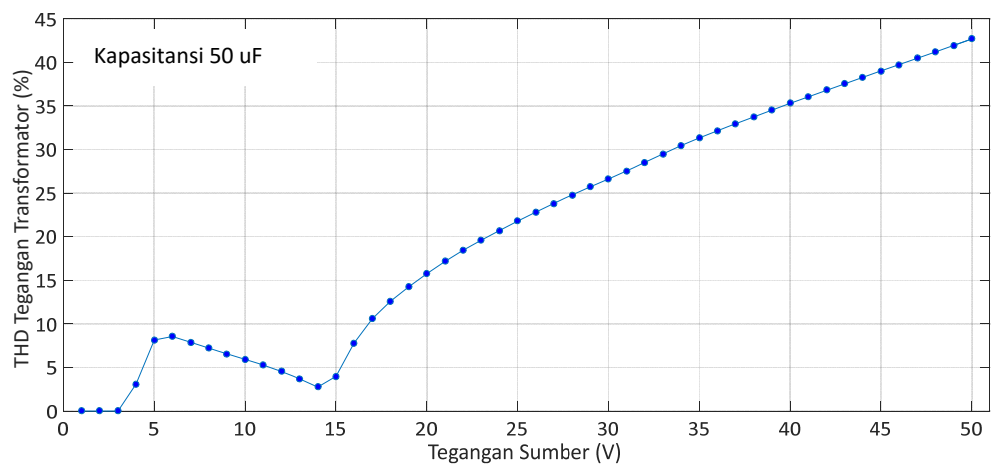
Gambar 4.15 THD Tegangan Berdasarkan Hasil Pengujian untuk Variasi Kapasitansi: a) 0 uF. b) 10 uF. c) 30 uF. d) 50 uF. e) 80 uF. f) 100 uF.



(a)

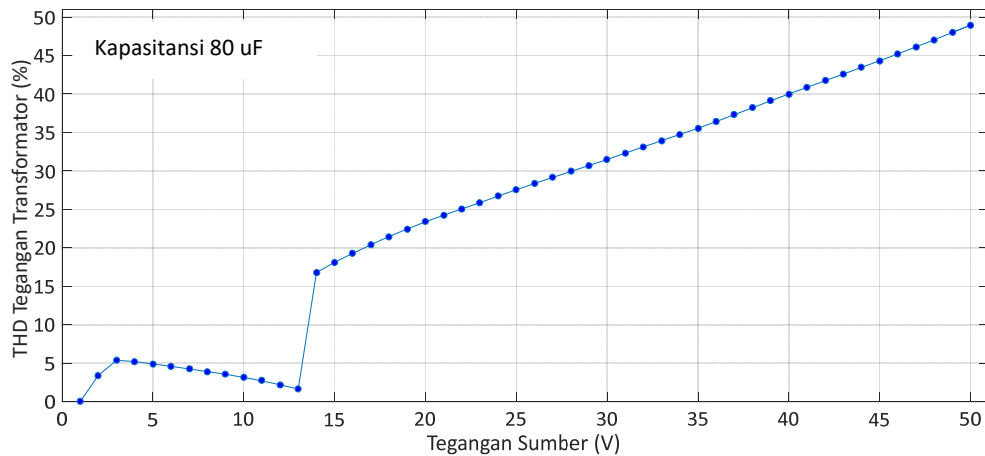


(b)

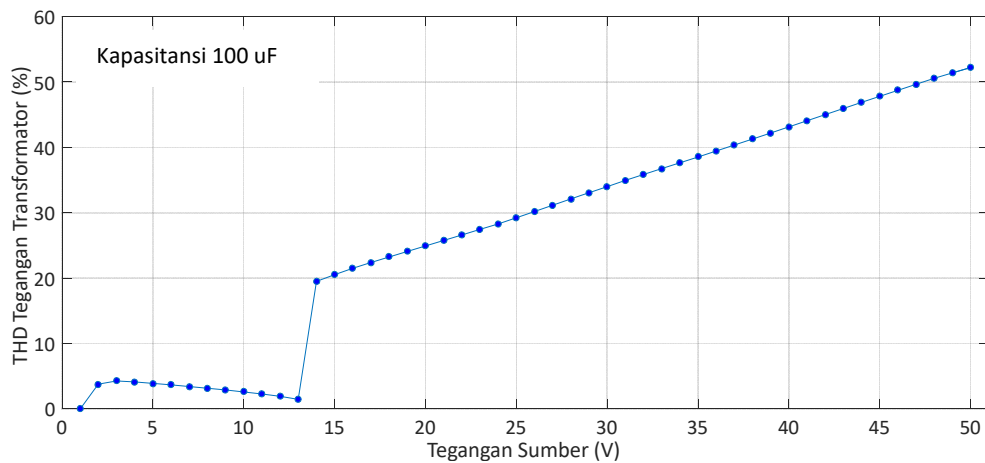


(c)





(d)



(e)

Gambar 4.16 THD Tegangan Berdasarkan Hasil Simulasi untuk Variasi Kapasitansi: a) 10 uF. b) 30 uF. c) 50 uF. d) 80 uF. e) 100 uF.

Hasil penghitungan THD berdasarkan simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Tabel 4.13. Pada simulasi dengan kapasitansi 10 uF nilai THD sama dengan nol pada tegangan sumber sebesar 1 V – 26 V. Kemudian THD meningkat dari 1.23 % hingga berada pada nilai yang relatif konstan sekitar 28 % ketika tegangan sumber sebesar 44 V. Pada pengujian dengan kapasitansi lebih besar, yaitu 30 uF, nilai THD sama dengan nol pada tegangan sumber sebesar 1 V – 7 V. Setelah itu, THD meningkat hingga mencapai 14.2 % pada tegangan sumber 11 V. Namun, THD menurun hingga bernilai 4.59 % pada tegangan sumber 24 V. Nilai THD kembali meningkat hingga mencapai 34.3 % pada tegangan sumber 50 V.

Kecenderungan THD yang fluktuatif tersebut juga ditemui pada kapasitansi 50 uF, 80 uF, dan 100 uF, namun kemunculannya berada pada tegangan sumber yang berbeda.

THD bernilai sama dengan nol ditemui pada tegangan sumber sebesar 1 V – 3 V untuk kapasitansi 50 uF dan 1 V untuk kapasitansi 80 uF dan 100 uF. Kemudian THD bertambah hingga mencapai 8.56 % (tegangan sumber = 6 V) untuk kapasitansi 50 uF, 5.37 % (tegangan sumber = 3 V) untuk kapasitansi 80 uF, dan 4.27 % (tegangan sumber = 3 V) untuk kapasitansi 100 uF. Selanjutnya, THD menurun hingga mencapai 2.76 % (tegangan sumber 14 V) untuk kapasitansi 50 uF, 1.64 % (tegangan sumber 13 V) untuk kapasitansi 80 uF, dan 1.47 % (tegangan sumber 13 V) untuk kapasitansi 100 uF. Nilai THD kembali meningkat hingga mencapai puncaknya pada tegangan sumber 50 V, yaitu 42.7 % untuk kapasitansi 50 uF, 49 % untuk kapasitansi 80 uF, dan 52.2 % untuk kapasitansi 100 uF.

Lonjakan THD secara signifikan yang ditandai sebagai *jump phenomenon* terlihat pada tegangan sumber 14 V dengan perubahan THD dari 1.64 % menjadi 16.8 % untuk kapasitansi 80 uF dan dari 1.47 % menjadi 19.5 % untuk kapasitansi 100 uF. Besar kedua tegangan tersebut sama dengan besar tegangan ketika lonjakan nilai rms tegangan transformator yang diamati pada diagram bifurkasi (Gambar 4.14 (d) dan (e)). Di samping itu, lonjakan THD ketika *jump phenomenon* pada kapasitansi 100 uF yang lebih besar ketimbang kapasitansi 80 uF menunjukkan bahwa besar kapasitansi berbanding lurus terhadap efek *jump phenomenon*.

Jika nilai THD maksimal (ditemui pada tegangan sumber sebesar 50 V) antara hasil simulasi dan pengujian dibandingkan untuk seluruh variasi kapasitansi, selisih nilai THD yang diperoleh bervariasi. THD maksimal berdasarkan hasil pengujian dikurangi dengan simulasi, sehingga selisih yang diperoleh sebesar 10.49 untuk kapasitansi 10 uF, 8.2 untuk kapasitansi 30 uF, 0 untuk kapasitansi 50 uF, -11.4 untuk kapasitansi 80 uF, dan -16.9 untuk kapasitansi 100 uF. Besar selisih tersebut sekaligus menunjukkan bahwa pada hasil simulasi besar kapasitansi menyebabkan THD maksimal yang diperoleh berbanding lurus terhadap besar tegangan sumber.

Tabel 4.12 Kecenderungan THD Berdasarkan Hasil Pengujian

Kapasitansi ( $\mu\text{F}$ )	THD Tegangan Transformator (%)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
10	76.98	51.98	51.70	76.24	60.19	60.14	46.60	52.85	49.07	50.62	56.48	57.31	54.08	51.74	51.75	49.08	47.77	47.51	38.87	39.20	42.56	40.59	39.66	39.44	38.58
30	15.34	17.9	14.1	10.01	19.09	12.3	12.4	16.4	13.1	12.7	13.6	11.4	10.4	10.7	9.55	9.4	9.72	9.36	9.48	9.66	9.86	10.05	10.52	10.85	11.4
50	7.1	10.8	11.3	5.93	6.37	5.66	5.753	5.6	5.93	6.04	6.3	6.11	6.48	6.59	6.75	7.06	7.5	8.68	10.54	14.2	16.5	18.55	20.26	22.03	23.2
80	7.6	4.08	4.37	3.87	4.21	4.14	4.12	4.11	4.15	4.11	4.09	4.27	4.22	4.36	4.6	4.95	5.45	18.73	20.29	21.6	22.8	23.57	24.18	25.07	25.7
100	4.7	4.02	4.04	3.29	3.47	3.53	3.315	3.4	3.25	3.33	3.49	3.42	3.54	3.69	3.77	3.95	4.33	4.78	20.96	21.96	22.9	23.48	24.06	24.61	25.2
Kapasitansi ( $\mu\text{F}$ )	THD Tegangan Transformator (%)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
10	37.01	37.70	38.03	36.28	36.15	35.93	37.05	36.85	37.51	38.23	38.85	38.95	39.30	39.33	40.15	39.44	40.30	40.39	40.62	41.06	41.00	40.24	39.73	41.01	38.79
30	12.3	12.8	14.3	15.47	17.4	17.8	20.04	21.9	23.96	25.01	26.5	28.3	29.2	30.9	31.7	33.4	34.6	35.35	36.4	37.4	38.7	39.4	41.04	41.74	42.5
50	24.8	26.1	26.98	28.11	28.9	30	30.84	31.6	32.4	33.2	33.8	34.5	35.2	35.8	36.5	37.4	37.9	38.6	38.97	39.8	40.4	40.8	41.36	41.98	42.7
80	26.5	27.1	27.6	28.19	28.9	29.2	29.87	30.5	31.04	31.5	31.96	32.3	32.8	33.3	33.7	34.2	34.4	34.99	35.3	35.7	36.1	36.5	36.88	37.21	37.6
100	25.7	26.2	26.7	27.15	27.7	28.2	28.61	29.1	29.5	29.8	30.3	30.7	31.02	31.4	31.9	32.3	32.6	32.9	33.2	33.6	33.97	34.1	34.59	34.92	35.3

Tabel 4.13 Kecenderungan THD Berdasarkan Hasil Simulasi

Kapasitansi (uF)	THD Tegangan Transformator (%)																								
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V	10 V	11 V	12 V	13 V	14 V	15 V	16 V	17 V	18 V	19 V	20 V	21 V	22 V	23 V	24 V	25 V
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	3.63	9.2	12.4	14.2	14.1	13.4	12.5	11.5	10.6	9.62	8.76	7.89	6.97	6.06	5.23	4.669	4.59	5.1
50	0	0.00	0.00	3.10	8.15	8.56	7.901	7.3	6.58	5.91	5.3	4.55	3.7	2.76	3.99	7.81	10.6	12.6	14.24	15.8	17.2	18.45	19.61	20.71	21.8
80	0	3.41	5.37	5.23	4.92	4.61	4.256	3.9	3.55	3.17	2.73	2.18	1.64	16.8	18.1	19.3	20.4	21.45	22.47	23.4	24.2	25.05	25.89	26.73	27.6
100	0	3.79	4.27	4.14	3.91	3.69	3.429	3.2	2.89	2.62	2.3	1.93	1.47	19.5	20.5	21.5	22.4	23.3	24.08	24.91	25.8	26.61	27.46	28.3	29.2
Kapasitansi (uF)	THD Tegangan Transformator (%)																								
	26 V	27 V	28 V	29 V	30 V	31 V	32 V	33 V	34 V	35 V	36 V	37 V	38 V	39 V	40 V	41 V	42 V	43 V	44 V	45 V	46 V	47 V	48 V	49 V	50 V
10	0	1.23	4.3	7.451	10.2	12.4	14.32	15.9	17.3	18.8	20.5	22.1	23.4	24.5	25.5	26.4	27.1	27.6	28	28.3	28.5	28.6	28.57	28.47	28.3
30	6.08	7.28	8.63	9.947	11.5	13	14.49	15.9	17.3	18.6	19.8	21	22.2	23.3	24.4	25.4	26.5	27.5	28.6	29.6	30.5	31.5	32.43	33.37	34.3
50	22.8	23.8	24.8	25.73	26.6	27.6	28.53	29.5	30.5	31.3	32.2	33	33.7	34.5	35.3	36.1	36.8	37.6	38.3	39	39.7	40.5	41.21	41.96	42.7
80	28.4	29.2	29.9	30.7	31.5	32.3	33.13	33.9	34.8	35.6	36.4	37.3	38.2	39.1	40	40.9	41.7	42.6	43.5	44.3	45.2	46.1	47.05	48.01	49
100	30.2	31.1	32.1	33.06	34	34.9	35.86	36.7	37.6	38.6	39.5	40.4	41.3	42.2	43.1	44.1	45	45.9	46.9	47.8	48.7	49.7	50.55	51.39	52.2

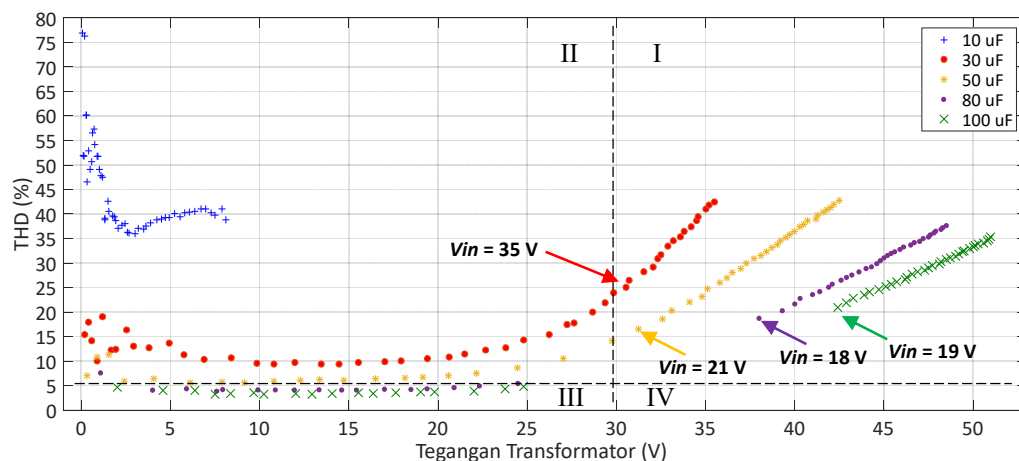
#### 4.1.6 Pengkategorian Respon Sistem

Hasil pengujian yang diperoleh dipetakan ke dalam sistem kuadran berdasarkan besar THD dan tegangan primer transformator. Pemetaan tersebut berguna tidak hanya dalam memahami karakteristik feroresonansi (diamati dari tingkat harmonisa dan besar tegangan transformator) melainkan juga dalam mengetahui tingkat efek feroresonansi. Pemetaan secara sederhana dilakukan dengan memplot nilai THD dan tegangan transformator ke dalam satu grafik. Kemudian grafik tersebut dibagi menjadi empat kuadran seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17

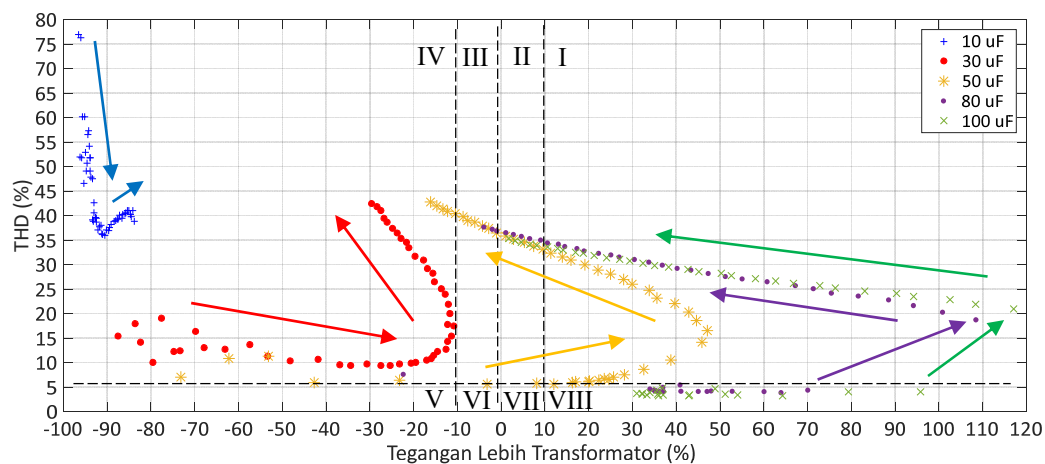
Pada kuadran pertama (I) nilai THD dan tegangan terukur pada transformator dikategorikan sebagai respon yang paling berbahaya, sebagaimana THD lebih dari 5 % dan tegangan terukur melebihi tegangan nominal transformator. Kondisi ini dijumpai pada variasi kapasitansi 30 uF, 50 uF, 80 uF, dan 100 uF sejak pemberian tegangan sumber tertentu. Pada kapasitansi 30 uF tegangan sumber minimal yang diperlukan sebesar 35 V agar tegangan transformator melebihi nominalnya (30 V), sedangkan pada kapasitansi lainnya tegangan sumber yang diperlukan kurang dari tegangan nominal transformator, yaitu 21 V untuk kapasitansi 50 uF, 18 V untuk kapasitansi 80 uF, dan 19 V untuk kapasitansi 100 uF.

Tingkat efek feroresonansi yang lebih rendah (dapat disebut sebagai gejala feroresonansi) terletak pada kuadran kedua (II). Meskipun tegangan transformator kurang dari nominalnya, THD yang diperoleh lebih dari 5 %. Kondisi tersebut dijumpai pada hasil pengujian dengan kapasitansi 10 uF untuk seluruh variasi tegangan sumber yang diberikan (1 V – 50 V), sedangkan pada variasi kapasitansi lainnya respon muncul ketika tegangan sumber kurang dari 35 V untuk kapasitansi 30 uF dan 21 V untuk kapasitansi 50 uF.

Respon yang cenderung normal (namun mendekati gejala feroresonansi) diamati pada kuadran ketiga (III), sebagaimana THD kurang dari 5 % dan tidak ada tegangan lebih pada transformator. Hasil pengujian yang termasuk ke dalam kuadran tersebut adalah pengujian dengan kapasitansi 80 uF untuk tegangan sumber kurang dari 18 V dan 100 uF untuk tegangan sumber kurang dari 19 V.



Gambar 4.17 Hubungan Tegangan Transformator dan THD.



Gambar 4.18 Hubungan Tingkat Tegangan Lebih Transformator dan THD.

Pemetaan kondisi sistem secara lebih detil ditunjukkan pada Gambar 4.18. Grafik tersebut memuat tingkat tegangan lebih transformator dan THD. Dalam pemetaan ini, besar tegangan sumber diasumsikan sebagai besar tegangan normal transformator. Tegangan lebih yang bernilai positif berarti tegangan transformator lebih dari tegangan sumber (tegangan lebih), sedangkan nilai negatif menunjukkan bahwa tegangan transformator kurang dari tegangan sumber (tegangan kurang).

Grafik pada Gambar 4.18 dibagi menjadi tujuh kuadran. Pembagian ini mengacu pada nilai batas tegangan lebih dan THD yang diijinkan (berdasarkan *ITIC Curve*). Besar tegangan lebih atau kurang yang diijinkan adalah sebesar 10 %, sedangkan besar THD adalah 5 %.

Hasil pengujian dengan kapasitansi 10 uF untuk seluruh variasi tegangan sumber (1 V – 50 V) berada pada kuadran keempat (IV). Hal ini berarti respon yang muncul berupa tingkat harmonisa yang tinggi dan disertai tegangan kurang serta nilai keduanya berada di luar batas yang diijinkan. Hasil pengujian dengan kapasitansi 30 uF untuk seluruh variasi tegangan sumber juga berada pada kuadran IV.

Pada pengujian dengan kapasitansi 50 uF respon yang diperoleh tersebar ke dalam kuadran pertama (I), kedua (II), ketiga (III), dan keempat (IV) sesuai dengan besar tegangan sumber yang diberikan. Semakin besar tegangan sumber maka kecenderungan respon yang muncul bergerak dari kuadran IV, III, II, I, II, III, dan IV. Pada kuadran II tegangan lebih masih berada pada batas yang diijinkan (kurang dari 10 %), sedangkan pada kuadran III tegangan kurang juga dalam batas yang masih aman (lebih dari -10 %).

Kecenderungan serupa ditemui pada hasil pengujian dengan kapasitansi 80 uF dan 100 uF. Dalam hal ini, kecenderungan pada kedua variasi kapasitansi tersebut bergerak dari satu kuadran ke kuadran lainnya. Pada awalnya, respon yang muncul sebelum kondisi *jump phenomenon* berada pada kuadran VIII. Setelah itu, seiring dengan peningkatan tegangan sumber, respon cenderung bergerak dari kuadran I ke II untuk kapasitansi 100 uF dan dari kuadran I, II dan ke III untuk kapasitansi 80 uF.

Adanya pemetaan yang lebih detil pada Gambar 4.18 turut membantu dalam menjelaskan kondisi tegangan transformator terhadap tegangan sumber, sebagaimana penjelasan tersebut tidak diperoleh pada Gambar 4.17. Hasil pengujian dengan kapasitansi 100 uF yang berada pada kuadran III pada Gambar 4.17 terlihat kurang dari tegangan nominal transformator. Namun, jika titik-titik tersebut diamati pada Gambar 4.18 maka tegangan transformator sebenarnya dalam kondisi tegangan lebih dengan tingkat yang tidak aman. Di sisi lain, pengujian dengan kapasitansi 30 uF dan pemberian tegangan sumber minimal sebesar 35 V menyebabkan tegangan terukur pada transformator di atas tegangan nominalnya (30 V). Namun, respon dari hasil pengujian tersebut berada pada kuadran IV (Gambar 4.18) yang menunjukkan bahwa tegangan transformator justru dalam kondisi tegangan kurang.

Di samping itu, kecenderungan THD dan besar tegangan lebih transformator terhadap variasi tegangan sumber lebih mudah diamati seperti ditunjukkan oleh garis panah pada Gambar 4.18. Kapasitansi yang semakin besar menyebabkan efek tegangan lebih pada transformator semakin terlihat. Peningkatan tegangan sumber berbanding lurus dengan tegangan transformator. Akan tetapi, pada kondisi saturasi tingkat kenaikan tegangan transformator menjadi berkurang sedangkan tingkat kenaikan THD justru menjadi lebih signifikan.

## **4.2 Inisiasi dan Karakteristik Feroresonansi pada Transformator Tiga**

### **Fasa**

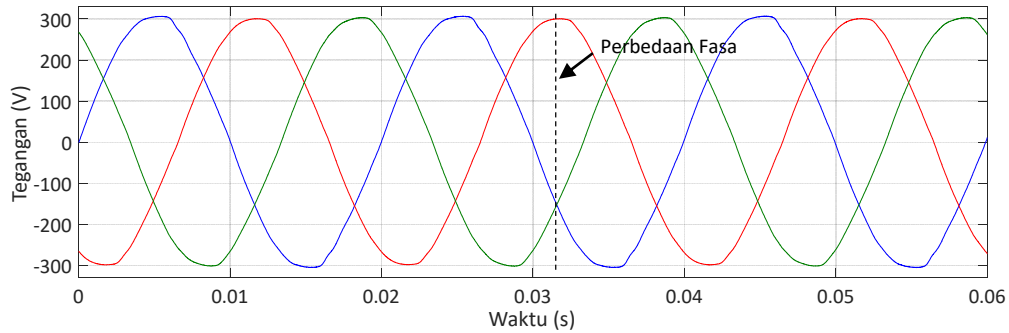
#### **4.2.1 Variasi Pelepasan Fasa**

Bentuk gelombang tegangan primer transformator tiga fasa berdasarkan hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.19 untuk kondisi normal (tanpa pelepasan fasa) dan Gambar 4.20 – 4.23 untuk kondisi pelepasan fasa. Bentuk gelombang kondisi normal pada Gambar 4.19 terlihat sinusoidal meskipun puncak gelombang sedikit tidak sempurna akibat *noise* dari peralatan akuisisi data dan harmonisa sumber. Selain itu, perbedaan sudut fasanya sebesar  $120^\circ$ , sebagaimana garis vertikal yang ditarik dari puncak gelombang fasa S yang menyinggung secara tepat titik perpotongan antara fasa R dan T. Hasil pengukuran arus menunjukkan bahwa adanya ketidaksimetrisan kaki inti (kaki fasa S yang terbesar) menyebabkan arus fasa S jauh lebih tinggi dibandingkan dua fasa lainnya, yaitu senilai 6.59 A pada tegangan sumber sekitar 220 V.

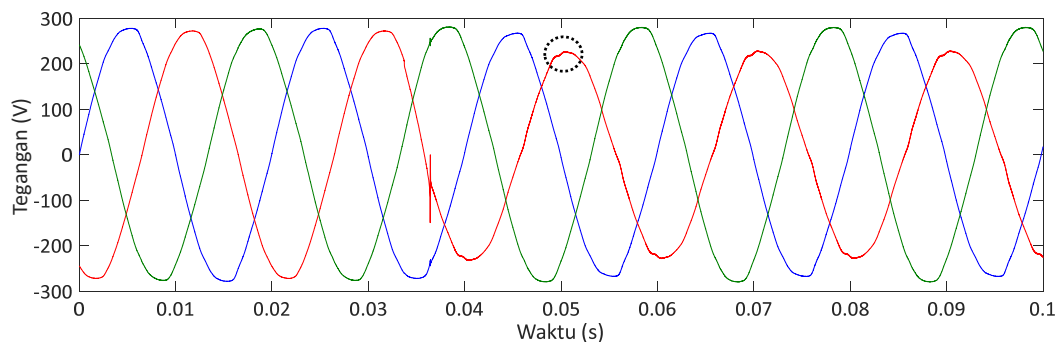
Bentuk gelombang tegangan setelah fasa S terlepas (akibat pembukaan pemutus daya atau saklar) ditunjukkan pada Gambar 4.20. Keanehan bentuk gelombang terlihat pada puncak gelombang fasa S yang terdistorsi disertai amplitudo gelombang yang menurun. Selain itu, nilai rms tegangan dan arus cenderung mengalami perubahan (ditunjukkan pada Tabel 4.14), terutama pada tegangan fasa S (dari 197 V menjadi 159.3 V), arus fasa R (dari 0.6 A menjadi 4.6 A) dan arus fasa T (dari 0.8 A menjadi 4.5 A). Perubahan nilai tersebut dapat diamati secara lebih mudah melalui perbedaan besar grafik batang pada kotak nilai seperti ditunjukkan pada Tabel 4.14. Adanya kenaikan arus pada fasa R dan



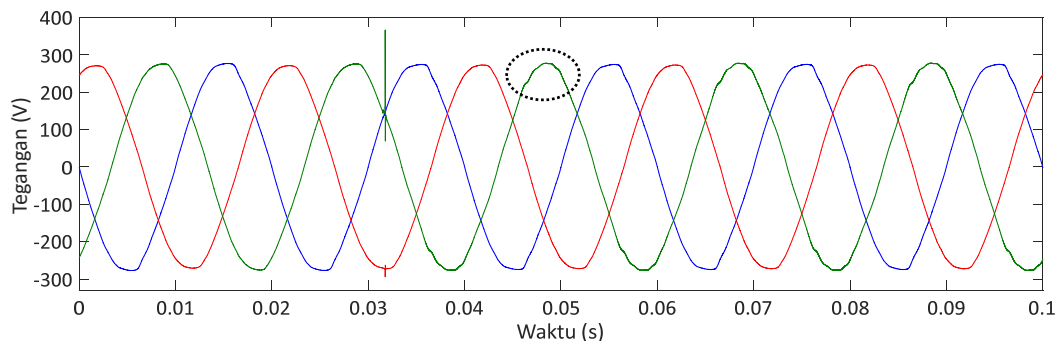
T menjelaskan bahwa arus fasa S berkontribusi paling banyak dalam menyuplai daya pada transformator sebelum fasa S terlepas (kondisi normal), namun setelah fasa S terlepas suplai daya diberikan oleh fasa R dan T secara seimbang (simetris).



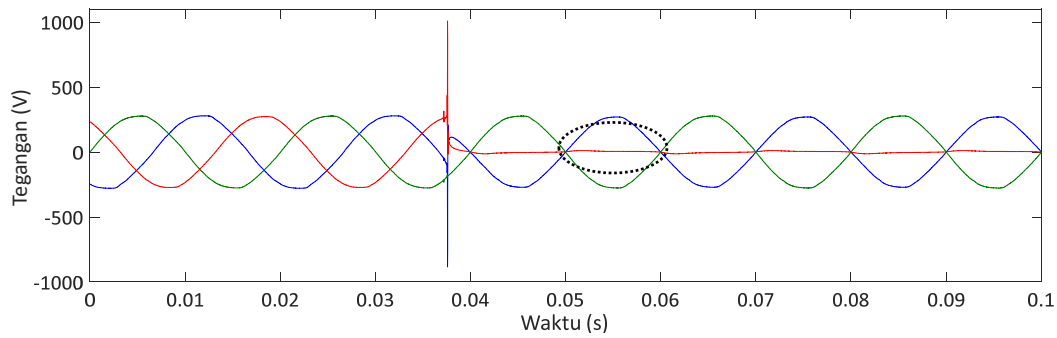
Gambar 4.19 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Kondisi Normal pada Tegangan Sumber 220 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



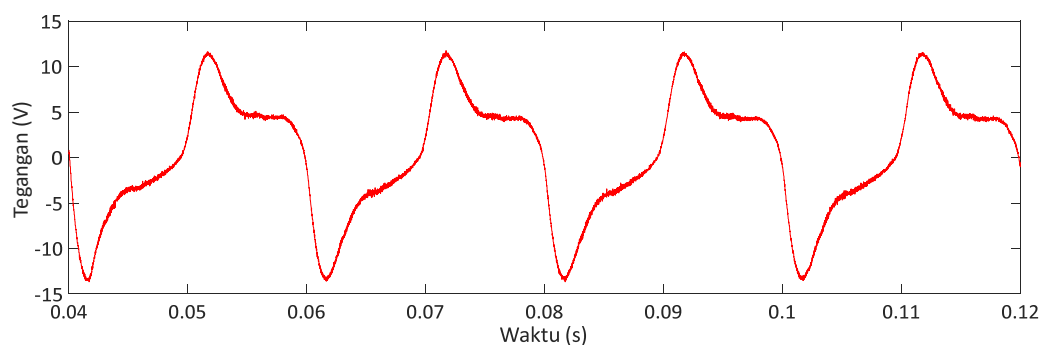
Gambar 4.20 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



Gambar 4.21 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.

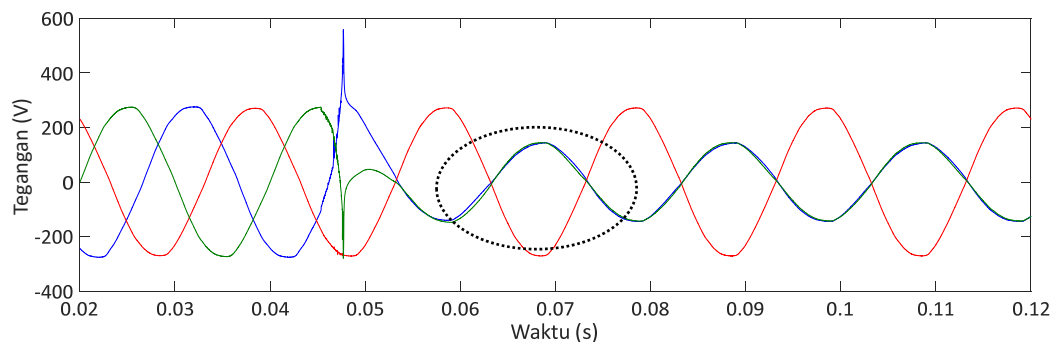


(a)



(b)

Gambar 4.22 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa R dan S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V: a) Fasa R, S, dan T. b) Fasa S. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



Gambar 4.23 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa R dan T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.

Tabel 4.14 Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan Sesuai Kondisi Fasa

Pengujian Ke-	Kondisi Fasa	Tegangan Sumber (V)			Tegangan Transformator (V)			Arus (A)		
		R	S	T	R	S	T	R	S	T
1	Normal	200	197	199	200	197	199	0.6	6.5	0.8
	S Terlepas	193	201	202	188.2	159.3	197.6	4.6	0	4.5
2	Normal	200.9	197.8	199.8	200.9	197.8	199.8	1	6.4	0.8
	T Terlepas	198	197	198	200.9	197.8	199.8	0.2	5.6	0
3	Normal	200	198	199	200	198	199.0	0.8	6.3	0.8
	R dan S Terlepas	199	201	198	187.3	5.8	194.4	0	0	0.3
4	Normal	200	196	199	200	196	199	0.9	6	0.8
	R dan T Terlepas	198	197	199	100.8	192.8	100.3	0	5.7	0

Pelepasan fasa T menimbulkan distorsi pada puncak gelombang fasa T seperti ditunjukkan pada Gambar 4.21. Di sisi lain, amplitudo gelombang tiga fasa cenderung sama, baik sebelum maupun setelah pelepasan fasa T. Hasil pengukuran juga menunjukkan tidak adanya perubahan nilai tegangan transformator. Selain itu, arus fasa S masih lebih besar daripada fasa R.

Keanehan yang lebih buruk terlihat pada pengujian dengan variasi pelepasan dua fasa. Pelepasan fasa R dan S menyebabkan gelombang fasa S terdistorsi disertai penurunan amplitudo yang signifikan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.22. Selain itu, gelombang fasa R dan T memiliki perbedaan fasa sebesar  $180^\circ$ . Bentuk gelombang terdistorsi pada fasa S sangat mirip dengan bentuk gelombang transformator satu fasa yang diperoleh dari hasil simulasi dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  dan tegangan sumber 50 V (Gambar 4.8 (d)). Penurunan nilai tegangan transformator pada fasa S, yaitu dari 198 V menjadi 5.8 V.

Keanehan hasil pengujian dengan pelepasan fasa R dan T terlihat pada gelombang fasa R dan T yang sefasa disertai penurunan amplitudo gelombang seperti ditunjukkan pada Gambar 4.23. Besar penurunan tegangan transformator secara signifikan diamati pada fasa R (dari 200 V menjadi 100.8 V) dan fasa T (dari 199 V menjadi 100.3 V). Di sisi lain, arus fasa S mengalami sedikit penurunan dari 6 A menjadi 5.7 A.

Tabel 4.15 Spektrum Harmonisa Sesuai Kondisi Fasa

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)											
	Fasa S Lepas						Fasa T Lepas					
	Sebelum			Setelah			Sebelum			Setelah		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T
50	280.32	275.43	278.46	269.06	230.04	283.00	277.74	273.78	276.50	275.54	275.43	276.81
100	0.69	0.48	0.68	0.79	0.41	0.55	1.17	0.68	0.94	1.53	0.85	1.31
150	0.70	1.10	0.37	1.13	1.34	0.11	0.59	1.37	0.57	0.73	1.70	2.16
200	0.30	0.13	0.11	0.33	0.12	0.15	0.52	0.29	0.21	0.49	0.26	0.22
250	3.79	3.11	3.52	3.80	3.44	3.53	3.12	2.76	2.85	3.11	2.61	2.39
300	0.21	0.04	0.13	0.20	0.10	0.18	0.26	0.07	0.16	0.30	0.11	0.16
350	1.31	0.96	1.07	1.42	1.27	1.08	2.23	1.83	1.84	2.30	1.81	2.23
400	0.15	0.06	0.07	0.14	0.04	0.10	0.33	0.11	0.18	0.33	0.06	0.25
450	0.70	0.39	0.37	1.07	1.47	0.58	0.93	0.40	0.42	1.24	0.69	1.90
500	0.12	0.08	0.11	0.11	0.05	0.14	0.19	0.12	0.14	0.12	0.12	0.08
THD %	1.50	1.27	1.36	1.65	1.82	1.34	1.52	1.35	1.30	1.62	1.37	1.65

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)											
	Fasa R dan S Lepas						Fasa R dan T Lepas					
	Sebelum			Setelah			Sebelum			Setelah		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T
50	281.69	275.66	279.07	270.59	8.34	280.12	278.87	272.80	274.98	144.02	273.36	143.28
100	0.13	0.27	0.13	1.50	0.88	0.55	0.17	0.27	0.19	2.80	0.20	2.95
150	1.16	0.57	1.51	3.56	3.64	0.66	0.58	1.00	0.31	1.00	1.20	0.83
200	0.18	0.16	0.17	0.40	0.38	0.06	0.02	0.08	0.09	0.85	0.14	0.71
250	2.80	2.83	3.26	2.45	1.39	3.05	4.09	3.38	3.89	1.86	3.40	1.69
300	0.16	0.08	0.10	0.23	0.13	0.10	0.04	0.04	0.03	0.29	0.04	0.32
350	2.17	1.62	1.86	1.90	0.45	1.91	1.27	0.81	1.16	0.54	0.82	0.31
400	0.03	0.02	0.09	0.06	0.08	0.06	0.04	0.08	0.05	0.13	0.07	0.16
450	0.76	0.37	0.51	0.67	0.24	0.78	0.69	0.44	0.41	0.34	0.67	0.35
500	0.08	0.02	0.13	0.01	0.04	0.05	0.11	0.05	0.04	0.06	0.03	0.10
THD %	1.36	1.21	1.46	1.86	48.53	1.35	1.57	1.34	1.49	2.55	1.38	2.53

Spektrum frekuensi yang diperoleh pada setiap variasi pelepasan fasa (ditunjukkan pada Tabel 4.15) dapat menjelaskan keanehan bentuk gelombang yang terjadi. Grafik batang diberikan pada setiap kotak nilai frekuensi non-fundamental. Grafik ini merepresentasikan perbandingan antara nilai pada frekuensi non-fundamental tertentu terhadap nilai tertinggi pada frekuensi non-fundamental. Grafik batang juga diberikan pada kotak nilai THD untuk mengetahui perubahan nilai sebelum dan setelah pelepasan fasa.

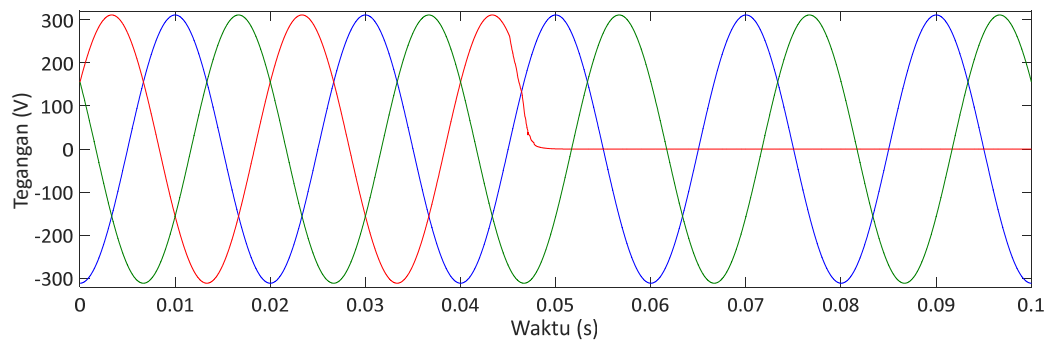
Pada pengujian dengan fasa S terlepas bentuk gelombang terdistorsi pada gelombang fasa S disebabkan oleh peningkatan frekuensi ganjil (non-fundamental) sedangkan frekuensi genap cenderung tidak berubah. Amplitudo frekuensi ganjil dari tertinggi ke terendah berturut-turut adalah 250 Hz, 450 Hz, 150 Hz, dan 350 Hz. Hal ini juga dapat diamati dari perubahan nilai THD fasa S,

yaitu dari 1.27 % (sebelum fasa S terlepas) bertambah menjadi 1.82 % (setelah fasa S terlepas).

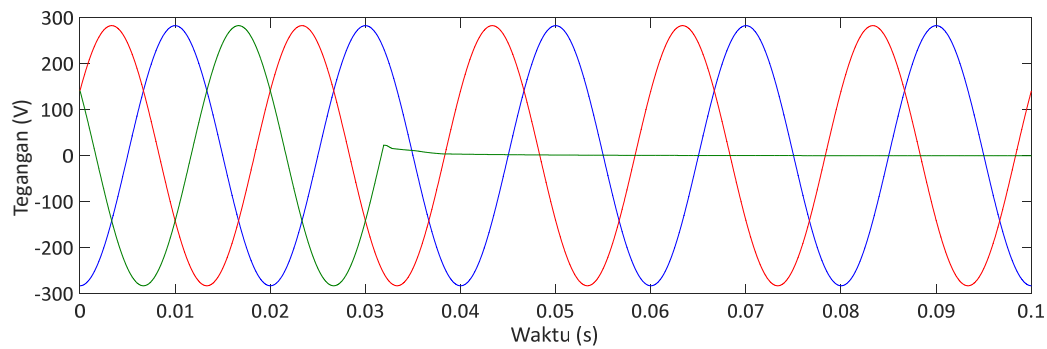
Bentuk gelombang fasa T yang terdistorsi pada pengujian dengan fasa T terlepas turut disebabkan oleh kenaikan frekuensi ganjil, kecuali frekuensi 250 Hz yang sedikit turun (dari 2.85 V menjadi 2.39 V). Kenaikan amplitudo frekuensi ganjil secara signifikan ditemui pada frekuensi 450 Hz, yaitu dari 0.42 V menjadi 1.9 V. Frekuensi ganjil dengan amplitudo dari terbesar hingga terkecil berturut-turut, yaitu 250 Hz, 350 Hz, 150 Hz, dan 450 Hz. Besar THD pada fasa T sebelum pelepasan fasa sebesar 1.3 %, sedangkan besar THD mencapai 1.65 % setelah pelepasan fasa. Sementara itu, perubahan kondisi fasa T seakan tidak berpengaruh terhadap frekuensi genap, sebagaimana perubahan amplitudonya tidak begitu nampak.

Kenaikan THD secara signifikan pada fasa S terlihat pada pengujian dengan fasa R dan S terlepas, yaitu dari 1.21 % menjadi 48.53 %. Hal ini didukung oleh bentuk gelombang fasa S pada Gambar 4.22 (b) yang sangat terdistorsi. Jika spektrum harmonisanya diamati, besar THD tersebut dipengaruhi terutama oleh kenaikan pada frekuensi 100 Hz (dari 0.27 V menjadi 0.88 V), 150 Hz (0.57 V menjadi 3.64 V), dan 200 Hz (0.16 V menjadi 0.38 V). Selain itu, kenaikan THD diamati pada fasa R, yaitu dari 1.36 % menjadi 1.86 %.

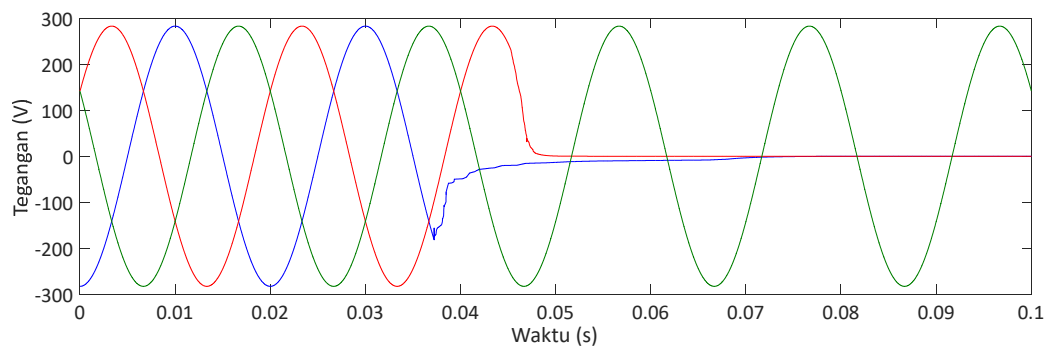
Pada pengujian dengan pelepasan fasa R dan T keanehan bentuk gelombang pada fasa yang terganggu disebabkan oleh kenaikan pada frekuensi 150 Hz dan frekuensi genap, seperti 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, dan 400 Hz. Akibatnya, nilai THD pada fasa R berubah dari 1.57 % menjadi 2.55 %, sedangkan nilai THD pada fasa T berubah dari 1.49 % menjadi 2.53 %. Peningkatan THD pada fasa R dan T ini menunjukkan bahwa bentuk gelombang terdistorsi hanya muncul pada fasa yang terganggu, seperti dijumpai pada pengujian pelepasan fasa sebelumnya.



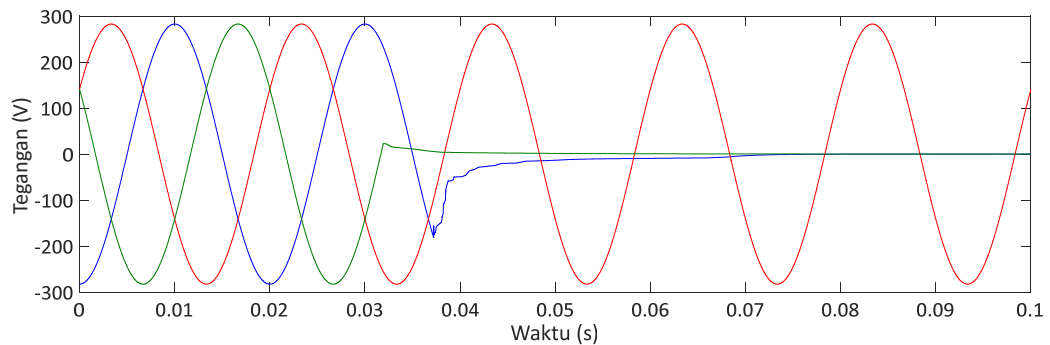
Gambar 4.24 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi Fasa S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



Gambar 4.25 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi Fasa T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



Gambar 4.26 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi Fasa R dan S Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.

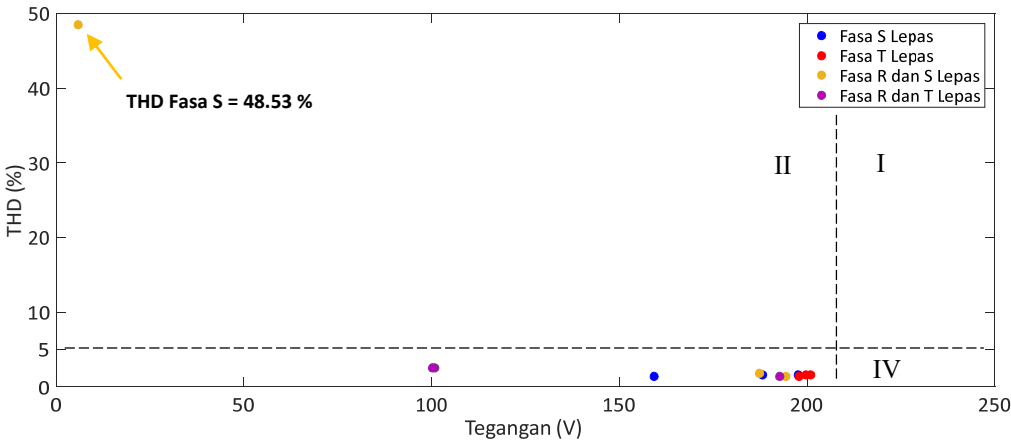


Gambar 4.27 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian Fasa R dan T Terlepas pada Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.

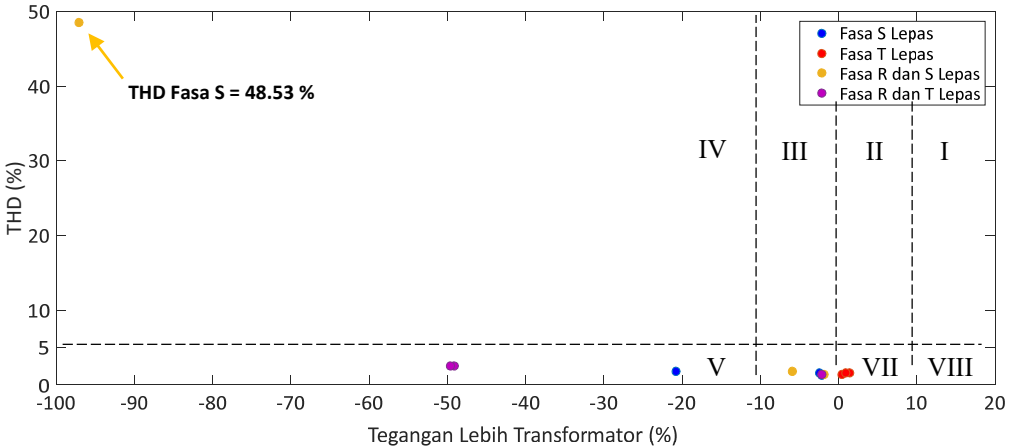
Bentuk gelombang tegangan transformator tiga fasa berdasarkan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.24 – 4.27. Jika bentuk-bentuk gelombang tersebut dibandingkan dengan hasil pengujian, bentuk gelombang setelah pelepasan fasa sangat berbeda terutama pada fasa yang terlepas. Dalam hal ini, keanehan bentuk gelombang setelah pelepasan fasa tidak terlihat. Amplitudo gelombang cenderung menurun hingga mendekati nol sejak pelepasan fasa. Hal ini menunjukkan bahwa efek fluks mutual pada inti transformator tiga fasa sangat mempengaruhi hasil pengujian. Di sisi lain, pemodelan transformator tiga fasa dengan ketidaksimetrisan kaki inti (distribusi fluks tidak simetris) pada ATPDraw hanya dapat dilakukan melalui penggunaan komponen induktansi non-linier. Artinya, model rangkaian yang dapat disimulasikan berupa susunan paralel dari tiga transformator satu fasa dengan kurva magnetisasi inti berbeda. Di samping itu, hasil ini sekaligus menunjukkan bahwa pemodelan rangkaian pada penelitian [13,14] tidak mampu merepresentasikan efek fluks mutual terhadap respon feroresonansi pada transformator tiga fasa meskipun kurva magnetisasi telah mempertimbangkan fluks mutual.

Berdasarkan spektrum harmonisa dan periode gelombang yang diperoleh, respon yang muncul untuk seluruh variasi pelepasan fasa diidentifikasi sebagai mode fundamental. Di samping itu, jika besar THD dan tegangan transformator dijadikan sebagai acuan dalam menentukan tingkat efek feroresonansi (seperti pemetaan pada transformator satu fasa), tidak ada respon yang berada pada

kuadran I seperti ditunjukkan pada Gambar 4.28. Respon pada kuadran tersebut memiliki tingkat harmonisa lebih dari 5 % dan tegangan transformator melebihi tegangan nominalnya. Akan tetapi, THD sebesar 48.53 % yang ditemui pada pengujian dengan pelepasan fasa R dan S dapat dikategorikan ke dalam kuadran II (gejala feroresonansi yang ditandai oleh harmonisa lebih dari 5 % dan tegangan transformator kurang dari tegangan nominalnya). Respon yang cenderung normal (namun mendekati gejala feroresonansi) pada kuadran III adalah hasil pengujian dengan variasi pelepasan satu fasa. Respon pada kuadran tersebut ditandai oleh adanya harmonisa kurang dari 5 % disertai tegangan kurang.



Gambar 4.28 Hubungan Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Tegangan Sumber 200 V



Gambar 4.29 Hubungan Tingkat Tegangan Lebih Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Tegangan Sumber 200 V

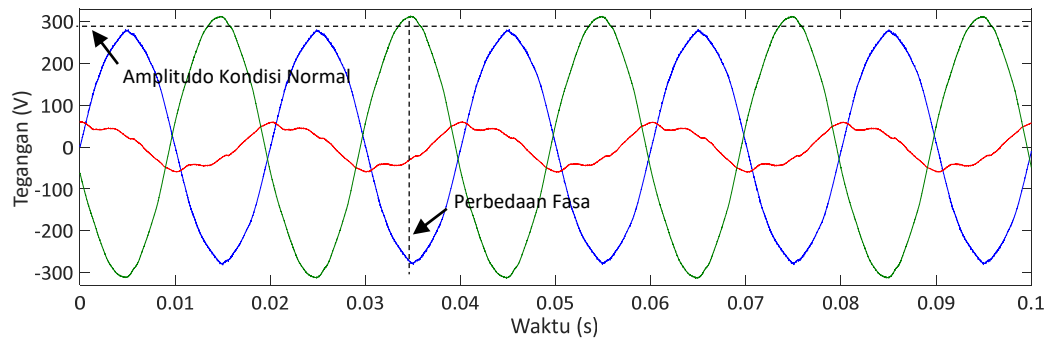


Pada pemetaan yang lebih detil (ditunjukkan pada Gambar 4.29) hasil pengujian dengan pelepasan fasa T berada pada kuadran VII. Kuadran tersebut menunjukkan bahwa tegangan transformator lebih dari tegangan sumber dengan selisih kurang dari 10 % dan harmonisa kurang dari 5 % (dalam batas aman). Adapun prosentase tegangan lebih tersebut adalah 1.4 % untuk fasa R, 0.4 % untuk fasa S, dan 0.9 % untuk fasa T. Hasil pengujian dengan kondisi tegangan kurang di luar batas yang diijinkan adalah pengujian dengan pelepasan fasa S (fasa S di kuadran V), pelepasan fasa R dan S (fasa S di kuadran IV), dan pelepasan fasa R dan T (fasa R dan T di kuadran V).

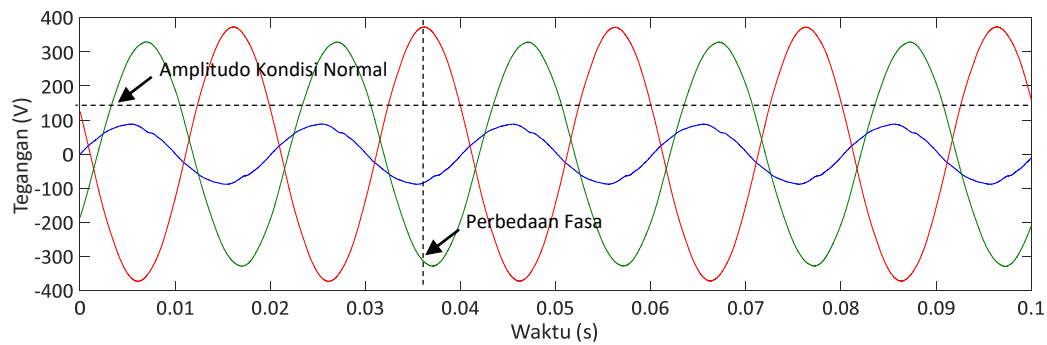
#### **4.2.2 Variasi Kapasitansi**

Pengujian dengan variasi kapasitansi 10 uF menghasilkan bentuk dan amplitudo tegangan transformator pada setiap fasa berbeda-beda seperti ditunjukkan pada Gambar 4.30. Bentuk gelombang terdistorsi disertai tegangan kurang ditemui pada fasa S, sedangkan tegangan lebih ditemui pada fasa T. Sementara itu, besar tegangan pada fasa R cenderung normal, namun puncak gelombang terdistorsi. Besar tegangan terukur pada transformator adalah 199.5 V untuk fasa R, 39 V untuk fasa S, dan 223.4 V untuk fasa T, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.16. Di samping itu, perbedaan sudut fasa tidak lagi sebesar 120°, melainkan sekitar 180°. Adapun grafik batang pada Tabel 4.16 merepresentasikan perbedaan nilai antar variasi kapasitansi dalam satu kolom.

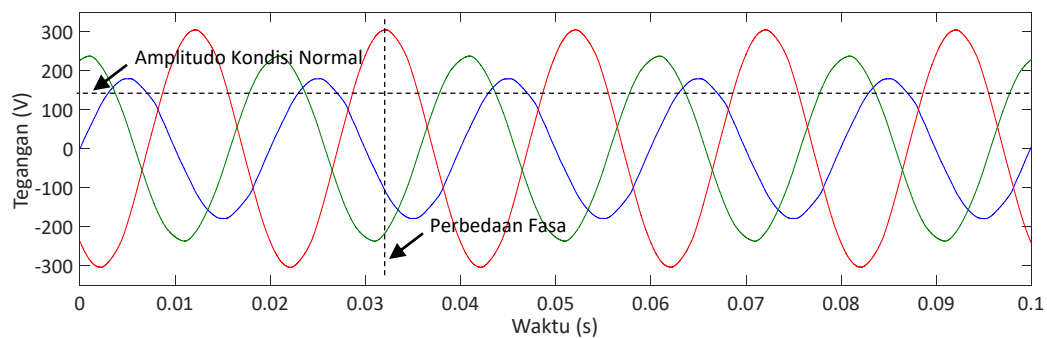
Besar tegangan kapasitor yang melebihi tegangan sumber terlihat pada fasa S, yaitu senilai 238 V. Dengan mempertimbangkan besar tegangan pada kapasitor tersebut, pengujian dengan kapasitansi 50 uF dan 100 uF dilakukan dengan pemberian tegangan sumber sekitar 100 V. Hal ini didasarkan pada hasil pengujian transformator satu fasa yang menunjukkan bahwa besar kapasitansi dan tegangan sumber berbanding lurus terhadap efek feroresonansi. Apabila pengujian dilakukan dengan kapasitansi yang lebih besar dari 10 uF dan besar tegangan sumber yang sama (200 V), besar tegangan kapasitor pada fasa S mungkin bernilai lebih tinggi dari tegangan nominalnya (450 V).



Gambar 4.30 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian dengan Kapasitansi 10 uF dan Tegangan Sumber 200 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



Gambar 4.31 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Pengujian dengan Kapasitansi 50 uF dan Tegangan Sumber 100 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



Gambar 4.32 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Hasil Pengujian dengan Kapasitansi 100 uF dan Tegangan Sumber 100 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.

Tabel 4.16 Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan Sesuai Variasi Kapasitansi

Kapasitansi (uF)	Tegangan Sumber (V)			Tegangan Kapasitor (V)			Tegangan Transformator (V)			Arus (A)		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T
10	200.5	200.6	200	71.5	238	170.9	199.5	39	223.4	0.25	0.77	0.55
50	100.1	96	95.2	166.6	320	174.1	61.2	263.1	230	2.55	5	2.73
100	100.02	97.8	103.3	70.7	130.5	68.3	125.3	214	165.1	2.18	4.05	2.12

Hasil pengujian dengan kapasitansi 50 uF menunjukkan adanya kondisi tegangan lebih secara signifikan pada fasa S dan T sedangkan fasa R justru mengalami kondisi tegangan kurang seperti ditunjukkan pada Gambar 4.31. Besar tegangan transformator terukur sebesar 61.2 V untuk fasa R, 263.1 V untuk fasa S, dan 230 V untuk fasa T. Selain itu, bentuk gelombang terdistorsi dijumpai pada fasa R. Pergeseran sudut fasa juga terlihat pada pengujian ini.

Hasil pengukuran arus menunjukkan bahwa besar arus pada ketiga fasa tergolong tinggi, yaitu 2.55 A untuk fasa R, 5 A untuk fasa S, dan 2.73 A untuk fasa T. Besarnya arus ketiga fasa tersebut menyebabkan belitan transformator terasa panas dan disertai bunyi dengung (*loud noise*). Di samping itu, besar tegangan kapasitor mengalami peningkatan secara signifikan dibandingkan dengan variasi kapasitansi 10 uF. Tegangan tertinggi kapasitor tersebut berada pada fasa S, yaitu sebesar 320 V, sedangkan tegangan kapasitor pada fasa R dan T terlihat lebih besar dibandingkan dengan tegangan sumber.

Kondisi tegangan lebih pada ketiga fasa ditemui pada pengujian dengan kapasitansi 100 uF seperti ditunjukkan pada Gambar 4.32. Besar tegangan transformator, yaitu 125.3 V untuk fasa R, 214 V untuk fasa S, dan 165.1 V untuk fasa T. Di sisi lain, tegangan kapasitor dan arus mengalami penurunan ketimbang hasil pengujian dengan variasi kapasitansi 50 uF. Besar tegangan kapasitor yang melebihi tegangan sumber hanya diamati pada fasa S. Selain itu, bentuk gelombang ketiga fasa cenderung normal. Akan tetapi, pergeseran sudut fasa turut terlihat pada hasil pengujian ini.

Keanehan bentuk gelombang yang terjadi pada hasil pengujian dapat dijelaskan secara kuantitatif melalui spektrum frekuensi dan THD seperti ditunjukkan pada Tabel 4.17. Grafik batang yang diberikan pada kotak nilai

frekuensi non-fundamental membandingkan nilai pada frekuensi non-fundamental tertentu terhadap nilai tertinggi pada frekuensi non-fundamental (dalam satu kolom), sedangkan grafik pada kotak nilai THD membandingkan nilai antar variasi kapasitansi.

Secara umum, adanya distorsi bentuk gelombang pada setiap variasi kapasitansi disebabkan terutama oleh kemunculan frekuensi ganjil. Besar frekuensi genap yang bernilai cukup signifikan terhadap frekuensi ganjil ditemui pada pengujian dengan kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  dan 100  $\mu\text{F}$ , yaitu frekuensi 100 Hz. Amplitudo frekuensi non-fundamental yang paling besar diamati pada frekuensi 150 Hz untuk kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  dan 250 Hz untuk kapasitansi 50  $\mu\text{F}$ . Di sisi lain, pada pengujian dengan kapasitansi 100  $\mu\text{F}$  amplitudo frekuensi ganjil yang terbesar bergantung pada fasanya masing-masing. Dalam hal ini, amplitudo tertinggi pada fasa R dan S dijumpai pada frekuensi 350 Hz, sedangkan amplitudo tertinggi pada fasa T ditemui pada frekuensi 250 Hz.

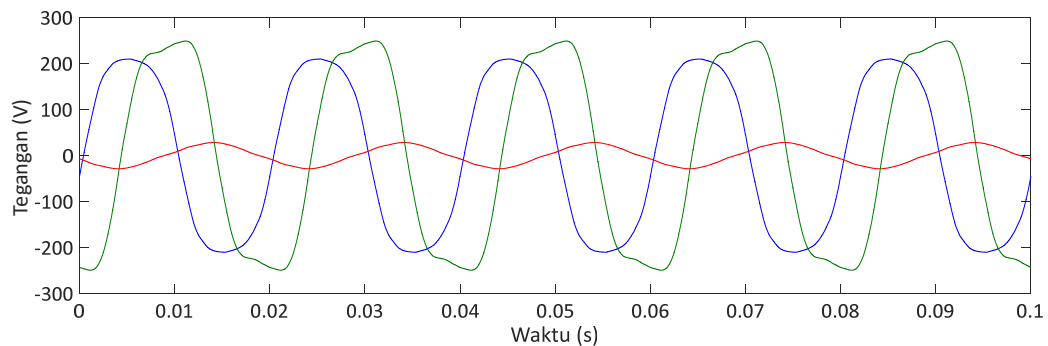
Nilai THD pada pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  lebih besar daripada variasi kapasitansi lainnya. Sementara itu, nilai THD pada kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  lebih besar daripada kapasitansi 100  $\mu\text{F}$ . Hasil ini menjelaskan bahwa besar kapasitansi bertolak belakang terhadap tingkat distorsi bentuk gelombang, sebagaimana nilai THD-nya yang cenderung rendah seiring dengan pemberian kapasitansi yang lebih besar. Nilai THD terbesar ditemui pada fasa S untuk kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  (18.37 %) dan fasa R untuk kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  (2.68 %) dan 100  $\mu\text{F}$  (1.17 %). Besarnya THD pada fasa S untuk kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  tersebut didukung oleh bentuk gelombang fasa S yang terlihat lebih buruk ketimbang fasa lainnya (ditunjukkan pada Gambar 4.26). Selain itu, jika nilai THD pada setiap fasa untuk seluruh variasi kapasitansi dibandingkan maka THD terbesar berada pada fasa S untuk pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$ .

Bentuk gelombang berdasarkan hasil simulasi dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  ditunjukkan pada Gambar 4.33. Kecenderungan bentuk gelombang tersebut menyerupai hasil pengujian seperti ditunjukkan pada Gambar 4.30. Hal ini diamati dari amplitudo gelombang dari tertinggi hingga terendah berturut-turut, yaitu fasa T, fasa R, dan fasa S.

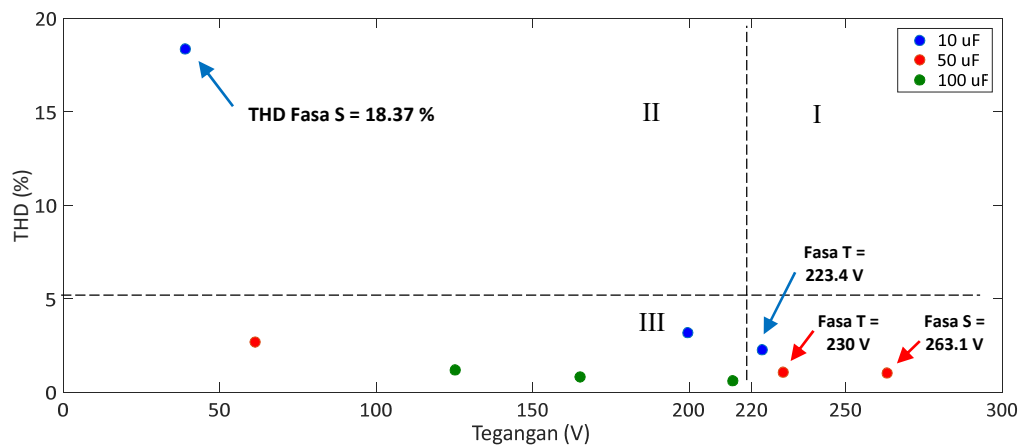
Tabel 4.17 Spektrum Harmonisa dan THD Sesuai Variasi Kapasitansi

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)								
	10 uF			50 uF			100 uF		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
50	282.78	54.66	317.36	87.17	374.76	329.48	178.79	304.17	236.24
100	0.52	0.34	0.76	0.45	1.63	1.25	0.19	0.28	0.16
150	7.51	8.81	5.53	0.90	2.89	2.58	0.37	0.83	0.67
200	0.30	0.18	0.13	0.05	0.54	0.52	0.12	0.12	0.02
250	4.13	3.86	3.59	1.49	1.61	1.48	1.39	1.08	1.35
300	0.17	0.01	0.17	0.13	0.39	0.30	0.06	0.08	0.06
350	2.66	2.82	2.71	1.40	0.79	1.09	1.42	1.17	1.15
400	0.06	0	0.06	0.09	0.26	0.20	0.08	0.05	0.02
450	0.40	0.48	0.40	0.49	0.46	0.57	0.44	0.34	0.27
500	0.07	0.02	0.07	0.06	0.18	0.14	0.03	0.01	0.03
THD %	3.18	18.37	2.26	2.68	1.03	1.06	1.17	0.61	0.81

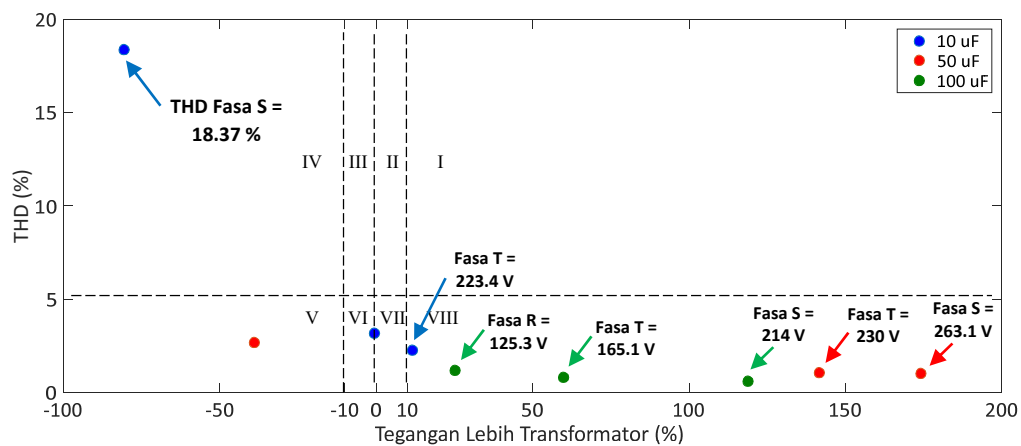
Adanya perbedaan amplitudo gelombang antara hasil simulasi dan pengujian dapat dijelaskan oleh beberapa hal, antara lain: a) sumber tegangan tiga fasa (*variac*) yang hanya dimodelkan sebagai sumber sinusoidal murni, sehingga komponen induktansi dan resistansi pada *variac* diabaikan. b) model rangkaian yang berupa tiga transformator satu fasa yang diparalel tidak dapat menunjukkan efek fluks mutual. c) keterbatasan nilai yang dapat dimasukkan pada komponen non-linier pada ATPDraw. Simulasi dengan kapasitansi yang lebih besar tidak dapat dilakukan karena ketidaklinieran pada komponen induktansi dan resistansi yang sangat tinggi menyebabkan program ATPDraw bermasalah (*error*).



Gambar 4.33 Gelombang Tegangan Primer Transformator Tiga Fasa Berdasarkan Simulasi dengan Kapasitansi 10 uF dan Tegangan Sumber 100 V. Biru: Fasa R. Merah: Fasa S. Hijau: T.



Gambar 4.34 Hubungan Tegangan Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Variasi Kapasitansi



Gambar 4.35 Hubungan Tingkat Tegangan Lebih Transformator Tiga Fasa dan THD Berdasarkan Pengujian dengan Variasi Kapasitansi

Hasil pemetaan tingkat efek feroresonansi berdasarkan THD dan tegangan transformator ditunjukkan pada Gambar 4.34. Kuadran IV yang ditandai oleh harmonisa kurang dari 5 % dan tegangan transformator melebihi tegangan nominalnya diisi oleh hasil pengujian dengan kapasitansi 50 uF untuk ketiga fasa dan kapasitansi 10 uF untuk fasa T. Hal ini menjelaskan bahwa meskipun pemberian tegangan sumber sebesar 100 V (lebih kecil daripada variasi kapasitansi 10 uF), efek kapasitansi 50 uF terlihat sangat signifikan hingga menyebabkan tegangan terukur pada transformator melebihi tegangan nominalnya. Kondisi ini berbeda dengan hasil pengujian dengan kapasitansi 100 uF pada tegangan sumber yang sama (100 V). Tegangan ketiga fasa pada

pengujian tersebut tidak sampai melebihi tegangan transformator, sehingga respon hanya berada pada kuadran III. Di sisi lain, tegangan fasa T pada pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  yang bernilai 223.4 V di kuadran I tergolong wajar karena memang tegangan sumber yang diberikan sekitar 220 V. Namun, efek kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  terlihat signifikan pada distorsi gelombang meskipun kondisi tegangan kurang dari tegangan nominal transformator. Hal ini diamati pada gelombang tegangan fasa S yang memiliki harmonisa di atas 5 %

Besar tegangan berdasarkan pengujian dengan kapasitansi 100  $\mu\text{F}$  yang bernilai kurang dari tegangan transformator ternyata berada dalam kondisi tegangan lebih yang tidak aman (lebih dari 10 %), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.35. Pemetaan pada Gambar 4.35 tersebut melibatkan tingkat tegangan lebih transformator terhadap tegangan sumber. Dalam hal ini, besar tegangan normal transformator dianggap sama dengan tegangan sumber yang diberikan (seperti pemetaan pada transformator satu fasa).

Hasil pemetaan pada Gambar 4.35 menunjukkan bahwa semakin besar kapasitansi maka tidak berarti efek feroresonansi semakin besar. Hal ini diamati pada hasil pengujian dengan kapasitansi 10  $\mu\text{F}$  yang memberikan THD paling tinggi, sehingga respon tersebut berada pada kuadran IV. Selain itu, hasil pengujian dengan kapasitansi 50  $\mu\text{F}$  memberikan tegangan lebih yang lebih tinggi daripada pengujian dengan kapasitansi 100  $\mu\text{F}$ . Hal ini terlihat dari titik-titik pada kuadran VIII dengan prosentase tegangan lebih terbesar berada pada hasil pengujian dengan kapasitansi 50  $\mu\text{F}$ .

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Beberapa hal yang dapat disimpulkan berdasarkan hasil pengujian, yaitu:

1. Faktor inisiasi yang diberikan mampu menunjukkan respon feroresonansi dengan efek yang berbeda. Efek feroresonansi yang berbahaya dijumpai pada pengujian transformator satu fasa dengan kapasitansi 50 uF, 80 uF, dan 100 uF. Respon yang muncul ditandai oleh tingkat harmonisa di atas 5 % dan tegangan lebih transformator terhadap tegangan sumber di atas 10 %. Sementara itu, pengujian transformator tiga fasa dengan variasi kapasitansi memberikan efek feroresonansi yang lebih berbahaya daripada variasi pelepasan fasa. Hal ini diamati dari sebagian besar hasil pengujian dengan variasi kapasitansi dalam kondisi tegangan lebih di atas 10 %, sedangkan sebagian besar hasil pengujian dengan variasi pelepasan fasa berada pada kondisi tegangan kurang. Di samping itu, efek-efek feroresonansi, baik berupa tingkat harmonisa tinggi maupun tegangan kurang dan lebih, lebih terlihat pada kaki inti fasa S yang lebih besar ketimbang fasa lainnya.
2. Lonjakan nilai dan distorsi gelombang tegangan primer secara signifikan akibat peningkatan nilai tegangan sumber sekitar 1 V (*jump phenomenon*) ditemui pada pengujian transformator satu fasa dengan kapasitansi 80 uF dan 100 uF. Kedua kapasitansi tersebut lebih besar ketimbang kapasitansi dari hasil penghitungan berdasarkan *Rudenberg' graphical method* (72.53 uF).
3. Pada pengujian transformator satu fasa semakin besar tegangan sumber dan kapasitansi maka semakin besar tingkat harmonisa dan tegangan lebih. Akan tetapi, pada tegangan sumber tertentu besar tegangan lebih cenderung menurun akibat tingkat kenaikan tegangan transformator yang menjadi relatif rendah saat kondisi saturasi.
4. Pada pengujian transformator tiga fasa dengan variasi pelepasan fasa efek feroresonansi yang paling berbahaya ditemui pada kondisi fasa R dan S terlepas. Hal ini ditandai oleh tingkat harmonisa fasa S senilai 48.53 %.

5. Pada pengujian transformator tiga fasa dengan variasi kapasitansi semakin besar kapasitansi maka tidak berarti semakin besar efek feroresonansi yang ditimbulkan. Pengujian dengan kapasitansi 50 uF justru memberikan tegangan lebih yang lebih tinggi daripada pengujian dengan kapasitansi 100 uF, namun pengujian dengan kapasitansi 100 uF memberikan tegangan lebih yang lebih tinggi daripada kapasitansi 10 uF. Di samping itu, pengujian yang memberikan tingkat harmonisa dari tertinggi hingga terendah berada pada variasi kapasitansi berturut-turut, yaitu 10 uF, 50 uF, dan 100 uF. Di sisi lain, perbedaan sudut fasa yang tidak sebesar  $120^\circ$  ditemui pada semua variasi kapasitansi. Fenomena ketidaklinieran ini menunjukkan adanya efek fluks mutual terhadap respon feroresonansi yang muncul.
6. Respon gelombang tegangan transformator yang diperoleh, baik dari hasil pengujian transformator satu fasa maupun tiga fasa, diidentifikasi sebagai mode fundamental. Hal ini dibuktikan oleh periode gelombang sebesar 20 ms dan spektrum harmonisa yang didominasi oleh frekuensi kelipatan integer dari frekuensi fundamental, terutama oleh frekuensi ganjil.

## 5.2 Saran

Berdasarkan kendala dan kekurangan yang ditemui pada penelitian ini, beberapa hal yang disarankan, antara lain:

1. Pengujian dilakukan dengan menggunakan sumber tegangan (*variac*) yang memiliki arus dan tegangan nominal jauh lebih besar daripada transformator yang diuji. Di samping itu, besar tegangan dan arus nominal pada kapasitor perlu dipertimbangkan dengan menyesuaikan kemungkinan besar tegangan lebih yang muncul.
2. Rangkaian pengujian feroresonansi dapat dikembangkan dengan menambahkan kapasitor yang disusun paralel dengan transformator. Hal ini akan mendekati kasus feroresonansi di lapangan.
3. Berdasarkan adanya efek mutual pada inti yang terlihat sangat mempengaruhi hasil pengujian, rangkaian simulasi transformator tiga fasa dengan ketidaksimetrisan distribusi fluks perlu dikembangkan, baik melalui program ATPDraw maupun program lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ferraci, P., (1998), *Ferroresonance*, Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28
- [2] S. V. Vonsovskii., (1966), *Ferromagnetic Resonance : The Phenomenon of Resonant Absortion of a High-Frequency Magnetic Field in Ferromagnetic Substances*, Oxford: Pergamon Express.
- [3] Emin, Z., Al Zahawi, B.A.T., Auckland, D.W. dan Tong, Y.K., (1997), "Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformer : A Study Based on Nonlinear Dynamics", *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.*, Vol 144, No. 4.
- [4] Hernanda, I.G.N.S., Negara, I.M.Y., Soeprijanto, A., Novandi dan Wahyudi, M., (2016), "Ferroreonance Characteristics Due To Lightning Strike on Capacitive Voltage Transformer", *IREMOS*.
- [5] Sinuraya, J.S.P., Negara, I.M.Y. dan Hernanda, I.G.N.S., (2016), *Analisis Pengaruh Kapasitansi Terhadap Feroresonansi pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Diagram Bifurkasi*, Tugas Akhir.
- [6] Bakar, A.H.A., (2011), "Analysis of lightning-caused ferroresonance in Capacitor Voltage Transformer (CVT)". *Electrical Power and Energy System*, Vol. 33, Hal. 1536-1541.
- [7] J. F. Piñeros, J. A. Vélez, dan D. Rodríguez, (2015), "Ferroresonance in a 115 kV Network Due to a Single Line Fault", *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2015)* in Cavtat, Croatia June 15-18.
- [8] Sanaye-Pasand, M., Aghazadeh, R., dan Mohseni, H., (2003), "Ferroresonance Occurrence During Energization of Capacitive Voltage Substations", *IEEE*.
- [9] Tahir Cetin Akinci, Nazmi Ekren, Serhat Seker dan Sezen Yildirim, (2013), "Continuous Wavelet Transform For Ferroresonance Phenomena In Electric Power Systems", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 44, Hal. 403–409.
- [10] Graovac, M., Iravani, R., Wang, X. dan McTaggart, R.D., (2003), "Fast Ferroresonance Suppression of Coupling Capacitor Voltage Transformers", *Ieee Transactions On Power Delivery*, Vol. 18, No. 1.
- [11] Huang, S.J. dan Hsieh, C.H., (2013), "Relation Analysis For Ferroresonance Of Bus Potential Transformer And Circuit Breaker Grading Capacitance", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 51, Hal. 61–70.
- [12] P. S. Moses dan M. A. S. Masoum, (2009), "Modelling Ferroresonance in Asymmetric Three-Phase Power Transformer", *IEEE*.

- [13] Hernanda, I.G.N.S, Negara, I.M.Y., Soeprijanto, A., Asfani, D.A., Fahmi, D., Andarini, K., dan Wahyudi, M., (2017), “Detection of Ferroresonance on Asymmetric Three Phase Transformer due to Capacitance Variation”, AUN/SEED-Net Regional Conference on Electrical and Electronics Engineering (RCEEE).
- [14] Abdi, H., Abbasi, S. dan Moradi, M., (2016), “Analyzing The Stochastic Behavior Of Ferroresonance Initiation Regarding Initial Conditions And System Parameters”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 83, Hal. 134–139.
- [15] Milicevic, K. dan Emin, Z., (2009), “Impact Of Initial Conditions On The Initiation Of Ferroresonance”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 31, Hal. 146–152.
- [16] Roy, M., dan Roy, C.K, (2008), “Experiments on Ferroresonance at Various Line Conditions and Its Damping”, *IEEE*.
- [17] Pattanapakdee, K. dan Banmongkol, C., (2007), “Failure of Riser Pole Arrester due to Station Service Transformer Ferroresonance”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST'07)*.
- [18] Milicevic, K., Vinko, D. dan Vulin, D., (2014), “Experimental Investigation Of Impact Of Remnant Flux On The Ferroresonance Initiation”. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 61, Hal. 346–354.
- [19] Sima, W.X., Yang, M., Yang, Q., Yuan, T. dan Zou, M., (2014), “Experiment On A Novel Method For Fundamental Ferroresonance Suppression”, *World Scientific Publishing Company, Modern Physics Letters B*, Vol. 28, No. 5 1450035.
- [20] Milicevic, K., Vinko, D. dan Emin, Z. (2011), “Identifying Ferroresonance Initiation For A Range Of Initial Conditions and Parameters”. *Nonlinear Dyn* 2011;66:755–62.
- [21] Milicevic, K. dan Emin, Z., (2014), “Investigation Of Possible Ferroresonance For A Voltage Range; Realisation Of A System Event With A Laboratory Setup”, *Int J Circuit Theory Appl*, 41:259–72.
- [22] Milicevic, K., dan Emin, Z., (2013), “Initiation of Characteristic Ferroresonance States Based on Flux Reflection Model”, *IEEE Transactions On Circuits And Systems—II: Express Briefs*, Vol. 60, No. 1.
- [23] Parker, T.S. dan Chua, L.O., (1989), “Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems” Springer.
- [24] Mork, B.A. (1992), *Ferroresonance and Chaos - Observation and Simulation of Ferroresonance in a Five Legged Core Distribution Transformer*, Ph.D. Thesis, North Dakota State University.

- [25] Craenenbroeck, T.V., Michiels, W., Dommelen, D.V. dan Lust, K., (1999), “Bifurcation Analysis of Three-Phase Ferroresonant Oscillations in Ungrounded Power System”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2.
- [26] Kieny, C., (1991), “Application of the Bifurcation Theory in Studying and Understanding the Global Behaviour of a Ferroresonant Electric Power Circuit”, *IEEE Trans. Delivery*, Vol. 6, No. 2, Hal. 866-872.
- [27] Amar, F.B. dan Dhifaoui, R., (2011), “Study of the Periodic Ferroresonance in the Electrical Power Networks by Bifurcation Diagrams”, *Electrical Power and Energy Systems*, 33, 61–85.
- [28] Ben-Tal, A., Shein, D. dan Zissu, S., (1999), “Studying Ferroresonance in Actual Power Systems by Bifurcation Diagram”, *Electric Power Systems Research*, 49, 175–183.
- [29] Corea-Araujo, J.A., González-Molina, F., Martínez, J.A., Barrado-Rodrigo, J.A. dan Guasch-Pesquer, L., (2013), “Ferroresonance Analysis Using 3D Bifurcation Diagram”, *IEEE*.
- [30] Ashari, M., (2012), “Sistem Konverter DC: Desain Rangkaian Elektronika Daya”, ITS Press.
- [31] Chapman, S.J., (2005), “Electric Machinery Fundamentals”, Mc Graw Hill.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

### A. Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa dengan Kapasitansi 10 uF

Tegangan (V)			Arus Transformator (A)	Tegangan (V)			Arus Transformator (A)
Sumber	Kapasitor	Transformator		Sumber	Kapasitor	Transformator	
1.848	1.899	0.065	0.00608	26.48	28.3	2.068	0.09
2.84	2.92	0.108	0.00939	27.63	29.6	2.288	0.0942
3.72	3.85	0.156	0.01233	28.6	31.1	2.47	0.098
4.33	4.43	0.175	0.01425	29.2	31.7	2.571	0.101
5.57	5.79	0.271	0.0186	30.17	32.5	2.68	0.103
6.25	6.49	0.276	0.0207	31.6	34.5	3.01	0.109
7.14	7.49	0.339	0.024	32.3	35.4	3.18	0.112
8.11	8.5	0.404	0.0272	33.5	36.8	3.48	0.117
9.38	9.84	0.492	0.0315	34.4	37.8	3.65	0.12
10.58	11.12	0.578	0.0355	35.6	39.2	3.9	0.124
11.52	12.15	0.634	0.0388	36.6	40.4	4.25	0.128
12.6	13.31	0.724	0.0425	37.5	41.6	4.5	0.131
13.15	13.88	0.77	0.0443	38.5	42.6	4.72	0.135
14.42	15.28	0.87	0.0487	39.4	43.5	4.92	0.138
15.3	16.18	0.928	0.0516	40.6	44.9	5.23	0.143
16.24	17.24	1.003	0.0547	41.6	46	5.54	0.146
17.57	18.65	1.112	0.0592	42.5	46.8	5.79	0.149
18.19	19.37	1.194	0.0615	43.4	47.9	6.08	0.153
19.46	20.79	1.324	0.0657	44.6	49.2	6.38	0.157
20.27	21.57	1.344	0.0682	45.6	50.4	6.7	0.161
21.39	22.84	1.495	0.0723	46.6	51.4	6.97	0.164
22.13	23.63	1.543	0.0748	47.5	52.3	7.3	0.167
23.78	25.51	1.75	0.0808	48.4	53.4	7.52	0.171
24.52	26.34	1.835	0.0833	49.6	54.6	7.9	0.175
25.61	27.3	1.95	0.0871	50.1	55.1	8.11	0.177

## B. Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa dengan Kapasitansi 30 uF

Tegangan (V)			Arus Transformator (A)	Tegangan (V)			Arus Transformator (A)
Sumber	Kapasitor	Transformator		Sumber	Kapasitor	Transformator	
1.51	1.677	0.188	0.0163	26.51	33.3	22.68	0.343
2.428	2.8	0.397	0.0272	27.22	35.1	23.79	0.358
3.245	3.77	0.57	0.0368	28.3	36.8	24.82	0.377
4.28	5.12	0.878	0.0498	29.6	39.2	26.25	0.403
5.4	6.53	1.21	0.0633	30.5	41	27.22	0.426
6.64	8.15	1.677	0.079	31.51	42.2	27.65	0.438
7.3	9.07	1.94	0.0878	32.5	44.5	28.67	0.468
8.51	10.79	2.564	0.105	33.4	46.2	29.35	0.49
9.15	11.7	2.94	0.114	34.2	47.9	29.85	0.508
10.31	13.45	3.81	0.131	35.4	50	30.54	0.534
11.55	15.3	4.92	0.15	36.2	51.3	30.7	0.549
12.35	16.51	5.77	0.163	37.4	53.3	31.54	0.576
13.3	17.85	6.88	0.175	38.5	55.4	32.05	0.599
14.47	19.53	8.43	0.192	39.3	56.6	32.32	0.613
15.6	20.81	9.85	0.206	40.5	58.6	32.5	0.638
16.42	21.82	10.79	0.216	41.7	60.4	32.9	0.658
17.23	22.56	11.96	0.227	42.4	61.4	33.2	0.671
18.54	24.27	13.44	0.241	43.6	63.2	33.6	0.694
19.35	25.15	14.44	0.25	44.3	64.3	33.8	0.705
20.23	26.24	15.55	0.261	45.5	66.3	34.2	0.728
21.45	27.4	17.03	0.276	46.6	68	34.5	0.746
22.28	28.3	17.95	0.285	47.2	68.7	34.6	0.758
23.4	29.8	19.4	0.301	48.3	70.4	35	0.777
24.53	31.2	20.62	0.315	49.1	71.6	35.2	0.792
25.44	32.3	21.5	0.326	50.4	73.4	35.5	0.813



### C. Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa dengan Kapasitansi 50 uF

Tegangan (V)			Arus Transformator (A)	Tegangan (V)			Arus Transformator (A)
Sumber	Kapasitor	Transformator		Sumber	Kapasitor	Transformator	
1.183	1.444	0.318	0.0231	26.24	47.5	35.1	0.846
2.4	3.24	0.909	0.0521	27.55	50.3	35.8	0.892
3.34	4.8	1.565	0.0776	28.3	52.3	36.2	0.93
4.22	6.38	2.416	0.102	29.2	53.5	36.5	0.951
5.3	8.51	4.07	0.137	30.3	55.8	37	0.993
6.3	10.3	6.1	0.167	31.31	57.3	37.3	1.02
7.31	11.55	7.91	0.188	32.54	59.1	37.7	1.05
8.16	12.37	9.14	0.201	33.4	61.1	38.1	1.09
9.31	13.35	10.82	0.219	34.5	62.9	38.4	1.12
10.51	14.2	12.3	0.232	35.3	64.2	38.7	1.15
11.11	14.82	13.36	0.244	36.3	65.5	39	1.17
12.26	15.56	14.72	0.256	37.2	66.8	39.2	1.2
13.51	16.6	16.52	0.274	38.4	68.9	39.5	1.24
14.56	17.52	18.14	0.29	39.3	70	39.7	1.25
15.51	18.21	19.15	0.302	40.4	71.6	40	1.28
16.37	19.2	20.58	0.319	41.5	73.2	40.3	1.31
17.3	20.4	22.16	0.34	42.3	74.4	40.5	1.34
18.45	22.61	24.46	0.379	43.3	75.8	40.7	1.37
19.48	25.56	27.02	0.439	44.6	77.6	41.2	1.4
20.4	30.3	29.75	0.532	45.2	78.5	41.3	1.42
21.25	34.2	31.25	0.596	46.5	80.3	41.6	1.45
22.54	38.4	32.6	0.677	47.6	81.8	41.8	1.48
23.17	40.2	33.1	0.71	48.4	82.7	42	1.5
24.43	43.4	34.1	0.769	49.5	84.4	42.2	1.53
25.66	46.3	34.8	0.823	50.7	86	42.5	1.56

#### D. Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa dengan Kapasitansi 80 uF

Tegangan (V)			Arus Transformator (A)	Tegangan (V)			Arus Transformator (A)
Sumber	Kapasitor	Transformator		Sumber	Kapasitor	Transformator	
1.394	2.4	1.082	0.061	26.5	59.6	42.6	1.68
2.499	5.27	4	0.137	27.67	61.4	42.9	1.73
3.47	6.33	5.9	0.165	28.57	63.1	43.2	1.78
4.63	7.04	7.59	0.186	29.6	65.1	43.6	1.83
5.36	7.2	7.93	0.189	30.7	66.9	44	1.89
6.48	8	9.9	0.21	31.6	68.2	44.3	1.93
7.4	8.34	10.88	0.219	32.6	69.8	44.6	1.98
8.24	8.73	11.95	0.229	33.5	71.2	44.8	2.02
9.45	9.23	13.33	0.243	34.5	72.9	45	2.05
10.65	9.67	14.6	0.255	35.6	74.1	45.2	2.09
11.33	9.97	15.43	0.263	36.3	75	45.4	2.12
12.56	10.5	17	0.279	37.3	76.6	45.6	2.16
13.67	11.1	18.48	0.295	38.6	78.3	45.9	2.22
14.37	11.4	19.39	0.305	39.3	79.2	46.1	2.25
15.6	12.18	20.9	0.324	40.6	81.1	46.5	2.31
16.3	12.83	22.32	0.344	41.3	82	46.7	2.33
17.38	14.18	24.48	0.383	42.5	83.9	47	2.38
18.23	41	38	1.15	43.3	85	47.2	2.42
19.57	45.3	39.3	1.27	44.6	86.9	47.5	2.49
20.6	48	40	1.35	45.5	87.9	47.6	2.5
21.38	49.6	40.3	1.4	46.5	89.4	47.8	2.53
22.58	52.3	41	1.47	47.4	90.4	47.9	2.57
23.6	54.5	41.4	1.54	48.7	92	48.2	2.61
24.46	56.4	41.9	1.59	49.3	92.8	48.3	2.64
25.18	57.2	42.1	1.61	50.5	94.4	48.5	2.69

### E. Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa dengan Kapasitansi 100 uF

Tegangan (V)			Arus Transformator (A)	Tegangan (V)			Arus Transformator (A)
Sumber	Kapasitor	Transformator		Sumber	Kapasitor	Transformator	
1.37	3.094	2.04	0.0893	26.28	63	45.4	2.15
2.35	4.71	4.6	0.15	27.4	64.9	45.7	2.2
3.54	5.27	6.35	0.171	28.4	67	46.2	2.28
4.56	5.81	7.49	0.185	29.28	68	46.3	2.31
5.45	6.12	8.39	0.194	30.52	69.8	46.6	2.37
6.39	6.35	9.66	0.207	31.2	71.3	46.9	2.43
7.17	6.68	10.24	0.212	32.6	73.5	47.3	2.5
8.39	7.14	12	0.23	33.3	74.5	47.5	2.54
9.5	7.42	12.92	0.238	34.5	76.3	47.7	2.6
10.26	7.8	14.06	0.248	35.6	77.7	48.1	2.66
11.44	8.22	15.53	0.264	36.4	79	48.2	2.69
12.3	8.47	16.39	0.272	37.5	80.5	48.5	2.74
13.31	8.84	17.61	0.284	38.3	81.5	48.7	2.78
14.36	9.26	19	0.3	39.5	83.4	49	2.84
15.11	9.55	19.79	0.309	40.6	84.9	49.2	2.9
16.42	10.43	22.01	0.34	41.6	86.1	49.4	2.94
17.52	11.35	23.75	0.369	42.3	87.1	49.5	2.98
18.13	11.94	24.81	0.384	43.6	88.8	49.8	3.03
19.53	49.4	42.4	1.68	44.3	89.6	50	3.07
20.59	51.7	42.9	1.76	45.3	91.2	50.1	3.12
21.38	53.6	43.3	1.86	46.5	92.7	50.3	3.17
22.6	56.2	43.9	1.91	47.5	93.7	50.6	3.22
23.23	57.5	44.2	1.95	48.6	95.3	50.8	3.27
24.42	59.8	44.7	2.03	49.3	96.3	50.9	3.31
25.57	61.8	45.1	2.1	50.1	97.3	51	3.34

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Mochammad Wahyudi. Lahir di Lumajang pada tanggal 27 Oktober 1992. Penulis mulai menempuh jalur pendidikan formal di TK Pembangunan 1 Jatiroto pada tahun 1997-1999. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan dasar di SD Pembangunan Jatiroto hingga tahun 2005. Setelah lulus dari jenjang pendidikan dasar dengan predikat peraih DANEM tertinggi di SD Pembangunan, penulis melanjutkan pendidikan menengah di SMPN 1 Jatiroto. Ketika berseragam SMP tersebut, penulis meraih penghargaan sebagai pemenang OSN Bidang Fisika di tingkat kabupaten. Pada tahun 2008, penulis memilih untuk melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Lumajang dan mampu menorehkan berbagai prestasi di bidang sains, seperti Juara OSN Fisika dan Juara Lomba Karya Tulis Ilmiah serta Finalis Lomba Sains Kimia dan Matematika. Dengan prestasi-prestasi tersebut, penulis dapat melanjutkan pendidikan di tingkat perguruan tinggi melalui jalur beasiswa SNMPTN Undangan Bidik Misi di Departemen Teknik Elektro ITS pada tahun 2011. Selama berstatus sebagai mahasiswa, penulis aktif dalam berorganisasi dan berkarya melalui lomba inovasi teknologi dan karya tulis ilmiah. Penghargaan yang paling berkesan yaitu Juara 1 OSN Pertamina, Peraih Medali PIMNAS XXV dan PIMNAS XXVI. Selain itu, penulis mendapatkan beasiswa TOTAL E&P Indonesia dan dipercaya sebagai koordinator asisten Lab. Konversi Energi Listrik serta Trainer Keilmiah ITS. Penulis lulus dari jenjang pendidikan sarjana pada tahun 2015 dengan predikat *cumlaude* dan masa studi 3.5 tahun. Kemudian penulis sempat beberapa bulan berkarir sebagai *Management Trainee* pada perusahaan swasta, hingga akhirnya pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan magister di Teknik Elektro ITS dengan beasiswa LPDP reguler. Selama menempuh studi magister, penulis terlibat aktif dalam kegiatan penelitian, pelatihan, dan pengabdian masyarakat di Lab. Tegangan Tinggi. Penulis dapat dihubungi melalui email: [mochwahyudi27@gmail.com](mailto:mochwahyudi27@gmail.com).

*Halaman ini sengaja dikosongkan*